Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»

С. О. Хомутов

СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

ООО «МЦ ЭОР», Барнаул - 2015

УДК 621.313.004.67 (075.8)
ББК 31.261.2 я 73-1

Хомутов, С. О. Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции [Электронный ресурс] : монография – / С. О. Хомутов. – Электронные данные. – Барнаул : ООО «МЦ ЭОР», 2015. – 1 эл. опт. диск (CD-R); 12 см.
– Рекомендуемые системные требования: ПК с част. ЦП 800 МГц и выше; Windows XP и выше; дисковод CD-ROM; Adobe Reader или др. программа для чтения файлов формата PDF. - Загл. с этикетки диска.

ISBN 978-5-9907546-0-7

В электронном издании рассмотрены вопросы создания системы поддержания надежности электрических двигателей, эксплуатируемых в промышленности и сельском хозяйстве, путем разработки методов и технических средств комплексной диагностики, а также теоретического обоснования способа интенсификации процессов тепломассопереноса и практической реализации электротехнологии восстановления изоляции обмоток для обеспечения высокой эффективности производства и улучшения условий труда обслуживающего и ремонтного персонала. Издание рассчитано на специалистов в области эксплуатации, обслуживания и ремонта электрооборудования, студентов специальности «Электроснабжение» и направления «Электроэнергетика и электротехника», преподавателей вузов, научных работников и аспирантов.

Рецензенты: А. А. Багаев, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» (АлтГАУ); А. Г. Якунин, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Информатика, вычислительная техника и информационная безопасность» (АлтГТУ).

ISBN 978-5-9907546-0-7

© Хомутов Станислав Олегович, 2015
© Электронное издание. ООО «МЦ ЭОР», 2015

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Как известно, необходимым условием безубыточной работы и эффективного функционирования в рыночных условиях любого сельскохозяйственного предприятия является минимизация всех производственных издержек, которая достигается путем анализа бизнес-процессов, процессов обеспечения и менеджмента с последующим применением современных технических средств и электротехнологий. Системный анализ данных процессов позволил из комплекса существующих проблем низкой эффективности технологических процессов в сельском хозяйстве выделить проблему обеспечения безотказной работы установленного на предприятии электрооборудования (ЭО), решение которой определяется надлежащей организацией системы повышения его надежности.

Исследования в области повышения эксплуатационной надежности электрооборудования можно условно разделить на два больших направления. С одной стороны – это работы, нацеленные на изучение и обеспечение высокого уровня надежности ЭО на стадии его проектирования и изготовления, с другой – связанные с вопросами поддержания заданного уровня надежности в ходе его технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Дополняя друг друга, данные исследования позволили в целом обеспечить определенный прогресс в сельском хозяйстве.

Особое значение вопрос повышения надежности приобретает для электрического двигателя (ЭД), как основного потребителя электроэнергии [1 – 4]. В процессе эксплуатации электродвигателей общепромышленного назначения, составляющих более половины всего парка двигателей, в условиях сельского хозяйства на интенсивность старения изоляции, как наиболее «слабого» и уязвимого элемента ЭД, влияют различные факторы: окружающая среда, режимы работы двигателя, техническое обслуживание и ремонт, а также текущее состояние электрической изоляции обмоток. В итоге, как правило, происходит ускоренное старение изоляции, результатом которого является выход ее из строя, и, как следствие, значительное сокращение реального срока службы электродвигателя по сравнению с заложенным заводом-изготовителем.

Так, выполненные в течение достаточно большого промежутка времени, начиная с 70-х годов прошлого века, и в последние годы века нынешнего на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края и ряда других регионов России исследования [4 – 15] показали, что от общего числа отказов элементов конструкции ЭД повреждения обмоток составляют более 80 % при значительной доле выхода двигателей из строя в результате межвитковых замыканий в обмотке статора. В общем случае, из-за нарушения изоляции попрежнему прекращают свою работу около 75 % электродвигателей, а экономический ущерб от выхода из строя одного двигателя достигает 20 тыс. руб. и более при стоимости нового ЭД – 1-8 тыс. руб. (в ценах 2009 года).

В целях недопущения простоя оборудования вследствие отказа электрического двигателя, необходим систематический контроль и своевременное

восстановление свойств изоляции. Однако на большинстве предприятий агропромышленного комплекса (АПК) система планово-предупредительных ремонтов (ППР) действует неудовлетворительно, а системный подход к учету количественно-качественных показателей выхода двигателей из строя и проведению профилактических мероприятий практически отсутствует. Наряду с этим, отмечены низкий уровень квалификации обслуживающего и ремонтного персонала, а также компьютеризации и применения новейших информационных технологий в производственном процессе [16], несмотря на то, что их использование, например, в области диагностики ЭД неизменно ведет к сокращению затрат на содержание парка электродвигателей. Об этом говорит и зарубежный опыт [17, 18].

Таким образом, существует **проблемная ситуация**, заключающаяся в необходимости увеличения срока службы электродвигателей в неблагоприятных условиях сельского хозяйства и отсутствии соответствующей данным условиям системы повышения их надежности, которая охватывала бы все стадии эксплуатации и ремонта двигателя, а также включала в себя специальный комплекс мероприятий, позволяющий проводить диагностику и необходимые восстановительные работы с минимальным участием обслуживающего и ремонтного персонала.

Глубокие теоретические исследования физических явлений, происходящих в диэлектриках, повлиявшие на качество работ в области изоляционной техники и расширившие представления о характере происходящих в изоляции процессов, а также явившиеся базисом науки об изоляции, были проведены такими известными учеными, как А. А. Воробьев, Ю. Н. Вершинин, С. Н. Койков, Г. С. Кучинский [19 – 22]. Развитию этого направления, разработке новых систем изоляции, их совершенствованию посвящены теоретические исследования Н. В. Александрова, Т. Ю. Баженовой, А. К. Варденбурга, Б. В. Кулаковского, П. М. Хазановского, А. В. Хвальковского, Л. Т. Пономарева и ряда других ученых [23 – 28].

Существенный вклад в разработку и создание методов неразрушающих испытаний изоляции электрических машин и аппаратов внесли такие крупные специалисты, как В. А. Баев, И. Е. Иерусалимов, Н. А. Козырев, труды которых хорошо известны и в настоящее время [29 – 31]. В свою очередь, обобщения в области изучения поведения различных изоляционных конструкций, большой объем экспериментальных данных, его систематизация и практическое использование нашли отражение в работах Л. М. Бернштейн, К. Н. Барэмбо, В. В. Маслова [32 – 34].

На сегодняшний день вопросы количественной оценки надежности электрических машин решаются весьма эффективно, чему немало способствовали достижения научных школ под руководством таких ученых, как О. Д. Гольдберг, Ю. П. Похолков, З. Г. Каганов, теоретические и экспериментальные работы которых известны как в нашей стране, так и за рубежом [35 – 38].

Как уже упоминалось, выход из строя электродвигателей в большинстве случаев является следствием отказов изоляции, как наиболее слабой их части. Знание механизма возникновения данных отказов во многом определяет направления исследований в области надежности изоляции обмоток. В работах ряда российских и зарубежных ученых исследованы законы распределения отказов ЭД, разработаны модели надежности изоляции, которые позволяют воссоздать достаточно объективную картину старения изоляции обмоток [9, 39 – 41]. Однако реальные условия эксплуатации не всегда представляется возможным адекватно смоделировать. Стремление уточнить теоретические положения на основе изучения реальной картины старения изоляции наталкиваются на необходимость разработки специальных технических средств.

В среде организаций – потребителей электрической энергии сложилось мнение, что существенное влияние на срок службы изоляции электрических машин оказывают температурные воздействия. Но, как показано исследованиями многих ученых [42 – 44], снижение температуры обмоток практически не приводит к сколько-нибудь существенному повышению их надежности. Кроме того, электродвигатели в сельском хозяйстве имеют низкое число часов использования в году, что в определенных условиях может позволить пойти на увеличение коэффициента загрузки свыше единицы. Завышение нагрузки в 1,2 – 1,3 раза практически не увеличивает общие затраты на эксплуатацию, т. е. перегрузки электродвигателей могут считаться экономически оправданными, а их значения необходимо выбирать из условий целесообразного нагрева изоляции [45 – 46].

В настоящее время в эксплуатации все еще находится большое количество электродвигателей старых серий. Результаты исследований температурных полей асинхронных двигателей серии АО2 показывают, что электродвигатели данной серии имеют запас по допустимому превышению температуры статора 15 – 30 % [47]. Несколько иначе дело обстоит с двигателями серии 4А. Тепловой запас электродвигателей этой серии значительно уменьшен. Исследованиями, выполненными в Томском государственном политехническом университете, а также Челябинской государственной агроинженерной академии [37, 48 – 51], показано, что многие двигатели серии 4А в номинальном режиме имеют среднее превышение температуры обмотки статора выше допустимого. Учитывая, что коэффициент неравномерности нагрева вдоль обмотки в электродвигателях 4А лежит в пределах 1,1 – 1,2, максимальная температура любых частей будет значительно выше средней. Следовательно, увеличение коэффициента загрузки в двигателях этой серии по условиям целесообразного перегрева возможно в очень небольших пределах. Расширение пределов у электрических двигателей 4А до 1,2 – 1,3 допустимо только при условии существенного их нагрева.

В первой половине 60-х годов появился целый ряд работ в области надежности, которые определили основные их направления [52 – 56]:

- исследование эксплуатационной надежности обмоток и анализ их отказов;
- создание методов количественной оценки показателей надежности и долговечности обмоток электродвигателей;
- исследование влияния конструкционных и технологических факторов на показатели надежности обмоток ЭД;
- анализ влияния эксплуатационных факторов на надежность изоляции обмоток двигателей и механизма ее износа;
- повышение надежности обмоток электродвигателей за счет разработки и создания новых систем изоляции, изоляционных материалов, пропиточных составов.

Исследованиями по перечисленным направлениям занимаются, преимущественно, ученые и специалисты, деятельность которых связана с повышением надежности электродвигателей на стадии их проектирования и изготовления. Вместе с тем необходимо признать, что вопросу изучения эксплуатационной надежности электрических машин, особенно в последнее время, уделяется недостаточно внимания. При этом следует заметить, что методы оценки показателей надежности изоляции по данным эксплуатации, хотя и считаются одними из самых достоверных, до настоящего времени не находили широкого применения из-за их невысокой оперативности. Успехи в области разработки новых эффективных средств информационного контроля и управления позволили несколько сместить вектор исследований в сторону интереса к этим методам [57 – 59].

Системный анализ отказов изоляции обмоток показал, что отказ наступает в результате пробоя изоляции в ее «слабом месте». Сопутствующими причинами отказа являются условия эксплуатации, включающие в себя и режимы работы, и условия окружающей среды. Однако независимо от причин отказов основной характеристикой изоляции обмоток многими авторами считается величина пробивного напряжения.

Значительные уточнения механизма возникновения «слабого места» сделаны Ю. П. Похолковым в его работах, посвященных дефектообразованию и влиянию на возникновение пробоя сквозных повреждений в изоляционных покрытиях [41]. Им же было начато рассмотрение вопроса оптимизации режимов пропитки для «залечивания» таких повреждений. Но технология сушки и пропитки остается до сих пор несовершенной, трудоемкой и крайне длительной. Нет и достаточно научно обоснованных методов и подходов к ускорению процессов сушки и пропитки [4, 47, 48, 57, 60 – 63].

Большая часть сделанных теоретических предпосылок по вопросам старения изоляции нашла свое подтверждение в результатах ускоренных испытаний изоляции обмоток на надежность [64]. Теоретический фундамент и методология ускоренных испытаний были заложены О. Д. Гольдбергом [52].

Общим для работ, посвященных расчетным методам оценки надежности изоляции, является синтез математических моделей процессов старения изоля-

ции на базе теории вероятности и математической статистики. Однако при достаточно большом количестве моделей имеют место значительные трудности их практической реализации, неуниверсальность и сложность. Кроме того, нет комплексного подхода к оценке состояния изоляции, тогда как работ, посвященных изучению влияния эксплуатационных факторов на ее надежность, существует довольно много [6, 14, 65 – 67].

Сделать какие-либо объективные выводы на основе этих исследований часто бывает затруднительно по причине их противоречивости. Существуют трудности и другого характера, например выбор и обоснование критериев оценки качества изоляции в условиях эксплуатации, выбор диагностических параметров. Выбор в качестве одного из критериев нагревостойкости изоляции не всегда бывает оправдан. При этом большая часть исследований выполняется на макетах, что в ряде случаев не отвечает реальному содержанию явлений, происходящих в изоляции, и дает противоречивые результаты.

Значительный вклад в развитие работ, связанных с исследованием эксплуатационной надежности электрооборудования и электрических систем, в т. ч. в условиях сельскохозяйственного производства, сделан видными советскими и российскими учеными И. А. Будзко, В. Н. Андриановым, И. И. Мартыненко, Л. Г. Прищепом, Г. И. Назаровым, В. Ю. Гессеном, Н. М. Зулем, Т. Б. Лещинской, Ю. А. Судником, С. П. Лебедевым, А. А. Пястоловым, Р. М. Славиным, А. М. Мусиным, Г. П. Ерошенко, А. О. Грундулисом, Ф. Я. Изаковым, В. Н. Вануриным, Н. Н. Сырых, А. М. Худоноговым, Л. А. Саплиным, В. Н. Делягиным, А. Е. Немировским, В. А. Буториным, О. К. Никольским, О. И. Хомутовым, А. А. Сошниковым и многими их коллегами [10, 63, 65, 68 – 84].

Интересны разработки А. О. Грундулиса по созданию устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов [7], а также работы Г. П. Ерошенко по совершенствованию системы эксплуатации электрооборудования и оптимизации ее элементов [85]. В успешном решении вопросов эксплуатационной надежности электрических машин существенную роль играет созданная д. т. н., профессором А. А. Пястоловым научная школа. Выполняемые его учениками работы посвящены изучению механизма влияния на изоляцию обмоток различных факторов внешнего воздействия. При этом особую значимость эти работы представляют с точки зрения изучения агрессивных и неблагоприятных условий эксплуатации.

Одно из первых мест в вопросах повышения надежности различных сложных объектов в настоящее время отводится технической диагностике и неразрушающему контролю состояния электрооборудования. На эксплуатационном этапе жизненного цикла электродвигателя крайне важны своевременное обнаружение дефектов, определение характера и условий их развития, что достигается с помощью специальных методов и средств диагностики, а также локализация дефектов и их устранение. Большой вклад в методологию диагностирования и разработку математических моделей диагностики внесли такие ученые, как Д. В. Гаскаров, Р. А. Макаров, А. В. Мозгалевский, П. П. Пархо-

менко, В. П. Таран, Э. К. Стрельбицкий, О. П. Муравлев, Ю. П. Ильин, С. А. Волохов, И. А. Биргер, А. А. Стеценко, Н. В. Коныгин, В. А. Русов, В. И. Сташко и др. [39, 86 – 97]. Однако в условиях эксплуатации методы безразборной диагностики изоляции электродвигателей практически отсутствуют.

Фундаментальные исследования в области тепло- и массопереноса были выполнены такими крупными учеными, как А. В. Лыков [98] и А. В. Лебедев. Особенностям кинетики и динамики вакуумной сушки, в частности, высоковольтной изоляции, посвящены работы П. С. Куца и И. Ф. Пикуса [99, 100], интенсификации процессов сушки и пропитки – работы К. Н. Барэмбо, Л. М. Бернштейн, В. И. Калитвянского, Р. С. Холодовской [33, 101 – 103].

В свою очередь, первые исследования, посвященные моделированию процессов эксплуатации различных технических элементов, были предприняты в прошлом веке математиками А. К. Эрлангом, А. Т. Пуассоном, которые дали ему название – теория массового обслуживания. Позднее, в нашей стране, данная теория активно исследовалась учеными К. М. Марковым, В. Б. Гнеденко, И. Н. Коваленко, А. Я. Хинчиным [104 – 106]. Результаты, полученные этими учеными, заложили основу современной теории массового обслуживания, позволяющей осуществлять планирование ремонтов электродвигателей на основе их диагностики. Однако большинство математических методов управления системами массового обслуживания по сегодняшний день находится в стадии теоретических исследований, а их практическая реализация требует больших временных и материальных затрат.

Таким образом, можно констатировать, что работы по изучению и обеспечению надежности электрических машин, выполняемые у нас в стране и за рубежом, уже сейчас имеют конкретный практический выход, что позволяет снизить аварийность электродвигателей. Появились новые изоляционные материалы, существенно улучшилась технология изготовления новых обмоточных проводов и в целом изоляционных конструкций. Появились новые и достаточно оперативные методы расчета показателей надежности на стадии проектирования и изготовления машин. Значительно расширились представления о механизме дефектообразования. Новое развитие получили методы математического моделирования дефектообразования и отказов изоляции обмоток. Накоплен большой статистический материал об аварийности электродвигателей и ее причинах в условиях эксплуатации.

Вместе с тем, несмотря на определенные успехи в этом направлении, **проблема** низкой эксплуатационной надежности ЭД, связанная с отсутствием теоретического обоснования комплексной оценки состояния электродвигателей, а также научно подтвержденных подходов к ускорению процессов разрушения связующего при удалении обмоток, пропитки и сушки изоляции в ходе обслуживания и ремонта, продолжает оставаться актуальной. Требуют дальнейшего развития теория прогнозирования состояния двигателей с учетом многофакторного характера воздействий, работы по созданию методов планирования сроков и объемов ТОиР ЭД. Разобщенность выполняемых в данных на-

правлениях исследований, безусловно, снижает тот эффект, который получен от внедрения уже законченных научно-исследовательских работ, т. е. необходимость научного обобщения и системного подхода к развитию теоретических и научно-технических основ в области повышения надежности ЭО очевидна.

Зарождение научной школы в области надежности электрооборудования в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), где выполнялась работа, относится к 1980-м годам. Комплексные исследования эксплуатационной надежности ЭО, выполненные в АлтГТУ, позволили на качественно ином уровне теоретически обосновать и практически реализовать модели деградации изоляции и прогностические модели ее состояния в течение всего срока службы. Исследования процессов тепломассопереноса стали основой для разработки моделей пропитки и сушки изоляции, что обеспечило выход на новую ступень в создании экологически чистых энергосберегающих электротермовакуумных технологий восстановления работоспособности электрических машин.

Весь комплекс представленных в данной монографии результатов исследований выполнялся на базе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» АлтГТУ. Ряд исследований, выполненных совместно с учеными кафедры под руководством доктора технических наук, профессора Хомутова О. И., успешно завершился защитой докторской диссертации автора, в которой предложены эффективные решения задач в области обеспечения надежности эксплуатации электрооборудования.

Устойчивое развитие научных исследований невозможно без прочных связей с предприятиями и научными организациями. Многолетними партнерами в рамках выполнения совместных научно-исследовательских работ являются филиал ОАО «МРСК Сибири»-«Алтайэнерго», ОАО «Сетевая компания Алтайкрайэнерго», ОАО «Алтайэнергосбыт», ООО «Барнаульская сетевая компания», Томский политехнический университет, Московский государственный агроинженерный университет, Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства и ряд других организаций и учреждений России.

С точки зрения методологии выполнения исследования по созданию системы повышения надежности электродвигателей, эксплуатирующихся на предприятиях агропромышленного комплекса России, очевидна необходимость применения системного подхода. Разработанная система представляет собой сложную искусственную систему, в которой структура взаимосвязей и взаимозависимостей многочисленных элементов носит разветвленный, т. е. трудно прослеживаемый характер. Для эффективного исследования процессов старения и восстановления изоляции ЭД на основе системного анализа автором предложен следующий сценарий:

- постановка задачи (формулировка проблемы и цели исследований);

– построение содержательной модели рассматриваемой системы, формализация цели управления объектом и выделение возможных управляющих воздействий, влияющих на достижение цели, а также ограничений на управляющие воздействия;
– построение математической модели (перевод в ту форму, в которой для ее изучения может быть использован математический аппарат) и оптимизация;
– решение задач, сформулированных на базе построенной модели;
– проверка полученных результатов на их адекватность природе изучаемой системы, включая исследования влияния внемодельных факторов, и корректировка первоначальной модели;
– реализация полученных решений на практике.

Кроме того, в рамках выполненной работы одной из важнейших задач системного анализа являлось определение перспективных направлений исследования, для решения которой необходимо было составить подробную и объемлющую структуру рассматриваемой системы повышения надежности электродвигателей. Полученные на сегодняшний день результаты многочисленных исследований позволили выявить следующие основные задачи повышения эксплуатационной надежности ЭД, в частности, изоляции обмоток статора, установить основные связи между ними, а также учесть взаимодействие полученной системы с внешней средой [1]:

1) повышение качества и интенсификация пропиточно-сушильных работ;

2) диагностика электродвигателей в условиях эксплуатации и прогноз их состояния на перспективу;

3) разработка технических средств измерения и контроля эксплуатационных и диагностических параметров;

4) количественная оценка степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции электрического двигателя;

5) создание системы прогнозирования состояния и планирования сроков обслуживания ЭД.

Таким образом, **целью выполненной работы** является создание системы повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве путем разработки методов и технических средств комплексной диагностики, а также теоретического обоснования способа интенсификации процессов тепломассопереноса и практической реализации электротехнологии восстановления изоляции обмоток для обеспечения высокой эффективности сельскохозяйственного производства и улучшения условий труда обслуживающего и ремонтного персонала.

В качестве **объекта исследования** выступают процессы изменения свойств изоляции обмоток в результате ее старения и восстановления.

Предметом научного исследования является получение новых закономерностей протекания процессов изменения свойств изоляции обмоток, по-

зволяющих осуществлять ее комплексную диагностику и эффективное восстановление в ходе эксплуатации и ремонта.

Для достижения цели работы сформулированы следующие **основные задачи:**

1) научно обосновать выбор метода оценки степени влияния факторов, воздействующих на состояние изоляции двигателя в реальных условиях эксплуатации и ремонта, а также разработать механизм и количественно оценить степень этого влияния;

2) исследовать и обосновать принципы диагностирования ЭД, а также разработать методы и современные технические средства комплексной диагностики на основе анализа закономерностей возникновения гармоник в спектре их внешнего магнитного поля (ВМП) и изменения параметров волновых затухающих колебаний (ВЗК) в обмотке при развитии различных дефектов;

3) построить математические модели, описывающие процессы старения и восстановления изоляции электродвигателей, устанавливающие взаимосвязь между параметрами переноса теплоты и массы под действием сил различной природы и значениями показателя качества изделий;

4) разработать единую эффективную электротехнологию разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции обмоток ЭД по замкнутому циклу, а также создать методику оптимизации режимов технологического процесса;

5) выполнить анализ систем массового обслуживания (СМО) и составить математическое описание параметров СМО для группы двигателей сельскохозяйственного предприятия, оперируя показателями надежности каждого ЭД с учетом всех возможных связей данной системы с внешней средой, а также осуществить постановку и решение задачи оптимизации параметров СМО;

6) разработать систему автоматизированной оценки результатов диагностики ЭД и прогнозирования наработки до очередного контроля их состояния на основе соответствующих математических моделей, позволяющих оценить остаточный срок службы электродвигателя и спланировать сроки и объемы проведения профилактических мероприятий и ремонтов.

Методы исследования. Для решения основных задач исследования использованы системная методология анализа процессов старения изоляции и тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах, методы теории подобия и моделирования с применением методов математической статистики и численных методов решения дифференциальных уравнений, логико-вероятностный метод расчета сложного изделия, математические методы оптимизации, численные методы аппроксимации функций, метод интегральных аналогов, а также методологии теории планирования экспериментов и информационно-логического анализа, обеспечивающие всестороннее исследование надежности двигателей, эксплуатирующихся в сельском хозяйстве.

Научная новизна работы. Впервые с использованием информационно-логического анализа получены модели процессов изменения свойств изо-

ляции обмоток, дающие возможность выявить основные направления повышения ее надежности с минимальными затратами.

Построены математические модели магнитного поля двигателя и волновых затухающих колебаний в обмотке при диагностике изоляции с учетом ее состояния и конструктивных особенностей ЭД. Разработаны методы и технические средства комплексной диагностики электрических двигателей в условиях эксплуатации и ремонта, основанные на анализе гармонического состава спектра напряженности внешнего магнитного поля ЭД и параметров волновых затухающих колебаний в обмотке (*патенты №№ 2208234, 2208236, 2283503*), а также предложены критерии и методика оценки состояния ЭД в сельском хозяйстве.

Выявлены закономерности протекания процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах под действием градиентов давления и температуры, разработана математическая модель пропитки и сушки обмоток ЭД, устанавливающая зависимость выбранного и обоснованного показателя качества ремонта от воздействующих в процессе восстановления изоляции факторов. На основе полученной модели создана методика оптимизации режимов пропитки и сушки обмоток и объема восстановительных мероприятий.

Предложен и теоретически обоснован новый способ разрушения связующего обмоток двигателей на основе вакуумирования (*патент № 2168831*). Разработаны конструкции установок для пропитки и сушки изоляции ЭД (*патент № 2191461*).

Предложена стратегия обслуживания ЭД на предприятиях с различными технологиями ремонта для получения оптимального для заданных условий эксплуатации качества. При использовании разработанных технических средств диагностики электрических двигателей создана система прогнозирования дополнительной наработки до очередного контроля их состояния (*патенты №№ 2208235, 2283501, 2283502*).

Построена математическая модель прогнозирования изменения состояния изоляции обмоток с целью назначения новой наработки до следующей диагностики ЭД, позволяющая оценить остаточный срок службы изоляции электродвигателя при дестабилизирующем воздействии внешних факторов и определить рациональные сроки проведения его обслуживания и ремонта.

Практическая значимость результатов исследований. Результаты проведенных исследований позволили развить научно-технические основы создания единой электротермовакуумной технологии разрушения связующего, пропитки и сушки электротехнических изделий по замкнутому циклу, а также разработать и внедрить новые методы и приборы диагностики в процессе применения на предприятиях АПК, обслуживания и ремонта, обеспечивающие получение достоверной информации при сравнительно низкой стоимости и простоте использования.

Созданная электротехнология единого комплекса восстановления изоляции обеспечивает высокое качество работ по техническому обслуживанию и

ремонту двигателей в короткие сроки в условиях безотходного и экологически чистого производства при экономии материальных и трудовых ресурсов, что при совместном использовании с комплексом средств измерения и прогноза в составе системы повышения надежности ЭД значительно повышает эффективность функционирования последней.

На основе разработанных конструкций установок по пропитке и сушке и соответствующей методики оптимизации режимов их работы могут быть созданы ремонтные установки различной производительности с автоматической системой управления на основе персонального компьютера.

Полученные математические модели позволяют агропромышленным предприятиям осуществлять организацию ремонта электрических двигателей с минимальными народно-хозяйственными затратами, а созданная автоматизированная система диагностики и прогноза срока службы электродвигателей дает возможность существенно упростить процесс планирования мероприятий по обслуживанию и ремонту ЭД.

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова в соответствии с грантами 2000 и 2003 гг. «Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому наукоемкому бизнесу «Ползуновские гранты» по темам «Тепловая вакуумная установка для восстановления изоляции ЭД» и «Оптимизация параметров технологического процесса скоростной вакуумной пропитки и сушки обмоток электрических машин»; с грантом Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых МК-7964.2006.8 на тему «Электротехнологические и технические системы повышения надежности электродвигателей» (2006-2007 гг.); с Концепцией развития электрификации сельского хозяйства России (Минсельхоз РФ, Минэнерго РФ, РАСХН / М., 2002 г.); с научно-исследовательскими работами, финансируемыми из средств федерального бюджета, по единому заказ-наряду, по заданиям Минобразования РФ в рамках тематических планов и в рамках ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» по темам: «Исследование надежности электрооборудования и разработка энергосберегающих, экологически чистых технологий его восстановления» (1995-1999 гг.), «Исследование процессов деградации и теоретические основы моделирования состояния полимерных электроизоляционных систем» (2000 г.), «Системный анализ и моделирование процессов старения и деградации изоляции электрооборудования» (2000-2004 гг.).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы и внедрены на объектах Алтайского края и других регионов России и стран ближнего зарубежья. Метод комплексной диагностики электродвигателей внедрен на ООО «ТОУРАК» Алтайского района, ООО «Техногранд» Первомайского района, филиале ОАО «ФСК ЕЭС» - Западно-Сибирское предприятие магистральных электрических сетей, Барнаульском филиале ОАО «Кузбассэнерго» Барнаульских ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3, ООО «Сибпромо» г. Барнаула.

Рекомендации по пропитке и сушке изоляции ЭД в условиях сельского хозяйства, а также методика оценки состояния изоляции и технические средства диагностики внедрены на производственно-ремонтном предприятии филиала ОАО «МРСК Сибири»-«Алтайэнерго», ОАО «Барнаульский шинный комбинат», ОАО «Завод синтетического волокна», ЗАО «Шадринское», крестьянских (фермерских) хозяйствах «Юг», «Луч», «Полюс» Калманского района, сельскохозяйственной артели (колхозе) «Первое мая», сельскохозяйственном производственном кооперативе «Советское», товариществе на вере «Горновское» Косихинского района Алтайского края.

Методика и рекомендации по восстановлению работоспособности электродвигателей, а также модель прогнозирования дополнительной наработки внедрены на ОАО «Алтайский приборостроительный завод «Ротор» г. Барнаула, ООО «Агропромэнерго» г. Камня-на-Оби, ЗАО «Тайнинское» и ЗАО «Горный нектар» Красногорского района, ООО «Восточное» Целинного района, ООО «АКХ «Ануйское» Петропавловского района Алтайского края.

Электротермовакуумная технология восстановления изоляции электрических двигателей, а также реализующие ее технические средства внедрены на производственно-ремонтном предприятии филиала ОАО «МРСК Сибири»-«Алтайэнерго» и на ОАО «Алтайсельэлектросетьстрой» г. Барнаула, сельскохозяйственных предприятиях ЗАО «Мичуринец» и ИП «Гущина» Алтайского района Алтайского края, на государственном унитарном предприятии «Новоалтайские межрайонные электрические сети», в филиале ОАО «МРСК Сибири»-«Горно-Алтайские электрические сети», в ТОО научно-производственное предприятие «КАН» Республики Казахстан.

Методика планирования сроков и типов ремонта электродвигателей при различных объемах выделяемых денежных средств рекомендована к применению Главным управлением сельского хозяйства администрации Алтайского края в качестве эффективной ресурсосберегающей технологии для предприятий АПК. Вероятностные модели процессов выхода из строя и восстановления электрооборудования используются отделами ППР ОАО «Барнаульский станкостроительный завод», ОАО «Русский хлеб». Система повышения эффективности процесса ремонта электрооборудования внедрена в АКГУП «Центральный» Калманского района и совхозе «Санниковский» Первомайского района Алтайского края.

Результаты работы используются в учебном процессе на энергетическом факультете Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова для студентов специальности 140211 – «Электроснабжение» и направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также в курсовом и дипломном проектировании (выполнении выпускной квалификационной работы).

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты работы были доложены и одобрены на 39 конференциях и совещаниях, включая Международную научно-техническую конференцию «Измерение, кон-

троль, информатизация» (Барнаул, 2001, 2006, 2007, 2008 гг.), III Международную научно-практическую конференцию «Интеллектуальные технологии в образовании, экономике и управлении» (Воронеж, 2006 г.), Международную научно-техническую конференцию «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2006, 2009 гг.), 1-ю Всероссийскую научно-практическую конференцию молодых ученых «Материалы и технологии XXI века» (Москва, 2000 г.), Всероссийскую научно-практическую конференцию «Наука и инновационные технологии для регионального развития» (Пенза, 2003 г.), научно-техническую конференцию с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Москва, 2004, 2006 гг.), XL научно-техническую конференцию «Челябинскому государственному агроинженерному университету – 70 лет» (Челябинск, 2001 г.), 1-ю региональную научно-практическую Интернет-конференцию «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (Орел, 2001 г.), 2-ю международную научно-техническую конференцию «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт» (Тобольск, 2004 г.), 4-ю Международную научно-техническую конференцию «Электрическая изоляция – 2006» (Санкт-Петербург, 2006 г.), 4-ю Всероссийскую научно-техническую конференцию «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2006 г.), научно-практическую конференцию с международным участием «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики» (Барнаул, 2007, 2008 гг.), IV Российскую научно-техническую конференцию «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2003 г.), 2-ю международную научно-практическую конференцию «Компьютер в современном мире» (Чита, 2000 г.), международную научно-техническую конференцию «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы» (Томск, 2003 г.), Международную научно-техническую конференцию «Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 2005, 2006 гг.), V Международную конференцию «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (Санкт-Петербург, 2003 г.), Международную научно-практическую конференцию «Электроэнергетика в сельском хозяйстве» (Новосибирск, 2009 г.).

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 разделов, основных выводов, библиографического списка из 517 наименований и 6 приложений.

Во введении обоснована актуальность проблемы повышения уровня эксплуатационной надежности электрических машин, сформулированы цель, задачи и методы исследований, научная новизна, практическая значимость работы, объект и предмет исследования, а также отражены вопросы апробации и реализации полученных научных результатов. Приводится краткое содержание каждого из разделов.

В первом разделе дан анализ современного состояния проблемы повышения надежности электродвигателей: исследован парк двигателей, эксплуати-

руемых на сельскохозяйственных предприятиях, выделены основные факторы, воздействующие на состояние электроизоляционной системы, проанализированы используемые методы и технические средства восстановления изоляции обмоток, а также обозначены основные пути повышения надежности ЭД на предприятиях АПК. Подробно рассмотрено применение информационно-логического анализа для выявления степени влияния основных факторов на наработку до очередного контроля состояния ЭД.

Во втором разделе рассмотрены методы и технические средства диагностики электродвигателей в агропромышленном комплексе, а также предложен комплекс диагностических средств на основе новых методик оценки состояния ЭД. Разработаны теоретические основы диагностики двигателей по зависимости гармонического состава их внешнего магнитного поля от степени развития дефектов: изучены проявления различных дефектов электродвигателя в спектре напряженности его ВМП, построены математические модели магнитного поля в воздушном зазоре двигателя, а также внешнего магнитного поля при витковых и фазных замыканиях. Экспериментально доказана зависимость изменений параметров ВМП от степени развития дефектов электродвигателя. Предложена система средств диагностики на основе измерения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке двигателя, выбран обобщенный диагностический параметр, положенный в основу оптимизации режимов электротермовакуумной технологии пропитки и сушки, показана возможность применения результатов проведенных исследований для прогнозирования остаточного срока службы ЭД, произведен выбор показателей эффективности технологических процессов пропитки и сушки изоляции двигателей.

В третьем разделе представлены основные результаты теоретических исследований процессов тепломассопереноса в обмотках электрических двигателей, которые построены на применении системной методологии к анализу процессов переноса энергии и массы вещества, протекающих в твердых капиллярно-пористых телах. Следуя принципам системного анализа, рассмотрены основные и наиболее значимые процессы, определяющие качество изоляции и формирующие методы восстановления работоспособности электрических двигателей. Приведены разработанные математические модели процессов тепломассопереноса и обоснована целесообразность использования скоростного вакуумирования для интенсификации этих процессов. Решена система дифференциальных уравнений переноса энергии и массы вещества для электротепловой вакуумной пропитки и сушки, что позволило установить закономерности протекания данных процессов и получить уравнения для расчета ряда параметров разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток электродвигателей. Там же приведены результаты экспериментальных исследований процессов тепломассопереноса в теле обмотки электродвигателя. Реализованы сравнительные эксперименты и ускоренные лабораторные испытания по отысканию зависимости качества изоляции ЭД от ре-

жимов пропитки и сушки, по результатам которых построен ряд математических моделей изучаемых процессов.

В четвертом разделе рассмотрены вопросы создания универсальной электротермовакуумной технологии, обеспечивающей замкнутый цикл выполнения операций разрушения связующего, сушки изоляции до пропитки, ее пропитки и сушки после пропитки, а также обобщены результаты оптимизационных исследований параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей. На основе анализа показателей эффективности рассматриваемого процесса, интересов участников рыночных отношений с точки зрения эксплуатации и ремонта ЭД, а также математического аппарата теории исследования операций сформирован комплекс решаемых задач оптимизации и для каждой предложен эффективный способ решения.

В пятом разделе, посвященном ситуационному планированию ремонтов электродвигателей на основе их диагностики, дан анализ используемых на практике методов планирования, определены показатели системы массового обслуживания ЭД в сельском хозяйстве, в т. ч. найдены закон распределения и длительности ожидания ремонтов отказавших двигателей при централизованной и собственной системе обслуживания. Осуществлена оптимизация показателей СМО двигателей для различных способов организации ремонта. Построены модели и разработана система автоматизированной оценки результатов диагностики и прогнозирования наработки до очередного контроля состояния ЭД, эксплуатирующихся в условиях сельского хозяйства.

Таким образом, работа носит завершенный характер и содержит описание всех основных составляющих комплексного прикладного научного исследования, завершившегося внедрением результатов изысканий в производство. Результаты выполненных исследований, продиктованных современной ситуацией в области ремонта электрооборудования, показали актуальность поднятой в монографии проблемы и позволили существенно повысить уровень эксплуатационной надежности ЭД на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края и близлежащих регионов России.

Автор глубоко благодарен сотрудникам кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», в особенности, Сташко В. И., Грибанову А. А., Рыбакову В. А. за помощь в проведении научных исследований и производственных испытаний, а также отдельно признателен своему отцу профессору Хомутову Олегу Ивановичу за неоценимый вклад в становление автора в качестве человека и ученого.

1 ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Кризис, поразивший мировую экономику, с наибольшей силой обрушился на машиностроительный комплекс страны. Инвестиционный спад поразил центральную часть производственного процесса – рабочие машины и технологическое оборудование большинства основных отраслей народного хозяйства. Структурная перестройка сельского хозяйства, становление рыночной экономики, децентрализация снабжения хозяйств, новые формы и механизмы хозяйствования, моральное и физическое старение технологического оборудования, вызванное недостаточным финансированием отрасли, – все это привело к снижению уровня сельскохозяйственного производства до уровня начала 90-х гг. прошлого столетия [5, 107].

Безубыточная работа и эффективное функционирование в создавшихся условиях любого сельскохозяйственного предприятия обеспечивается минимизацией всех производственных издержек, которая достигается путем анализа бизнес-процессов, процессов обеспечения и менеджмента с последующим применением современных технических средств и электротехнологий. Системный анализ данных процессов позволил из комплекса существующих проблем низкой эффективности технологических процессов в сельском хозяйстве выделить проблему обеспечения безотказной работы установленного на предприятии электрооборудования, решение которой определяется надлежащей организацией системы повышения его надежности. При этом должна быть решена весьма сложная и важная задача по снижению затрат на восстановление работоспособности оборудования в процессе его обслуживания и ремонта. Особое значение вопрос повышения эксплуатационной надежности приобретает для электрического двигателя, как основного потребителя электроэнергии, направляемой для преобразования в механическую работу [108].

С точки зрения системного анализа в любом научном исследовании необходимо иметь четкое представление о различных сторонах изучаемого объекта. Конкретизация используемой терминологии и краткая информация по рассматриваемой проблеме являются неотъемлемым элементом анализа, способствующим правильному пониманию круга решаемых вопросов, а также сделанных в ходе выполнения работы выводов.

1.1 Структура парка электрических двигателей, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственного производства

В настоящее время асинхронный электропривод остается наиболее массовым типом привода в сельскохозяйственном производстве и основным потребителем электрической энергии. Выпуск электрических двигателей мощностью от 0,75 до 300 кВт в Российской Федерации составляет более 1 млн. шт. в год. При этом в различных отраслях и установках с тяжелыми условиями работы технологического электрооборудования (в т. ч. и в сельском

хозяйстве) коэффициент замены аварийных электродвигателей составляет от 0,5 до 2 [3].

На сегодняшний день широкое распространение в агропромышленном комплексе получили асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором [2, 4]:

– общепромышленных серий: А, АО, А2, АО2, 4А (4АМ, АИР), 5А, 6А, РА;
– специальных серий для сельского хозяйства: АО2...СХ, ДА…С, 4А...С и др.

При этом процентное распределение данных серий двигателей и их модификаций среди общего числа электрических машин на различных сельскохозяйственных предприятиях сложилось по-разному, что связано, прежде всего, с периодом интенсивного развития электрификации процессов производства в том или ином хозяйстве. По данным, полученным при обследовании сельхозпроизводителей Алтайского края [1, 2], распределение по сериям ЭД выглядело следующим образом – рисунок 1.1.

Аналогичная ситуация имеет место и в других регионах России и ряде стран ближнего зарубежья.

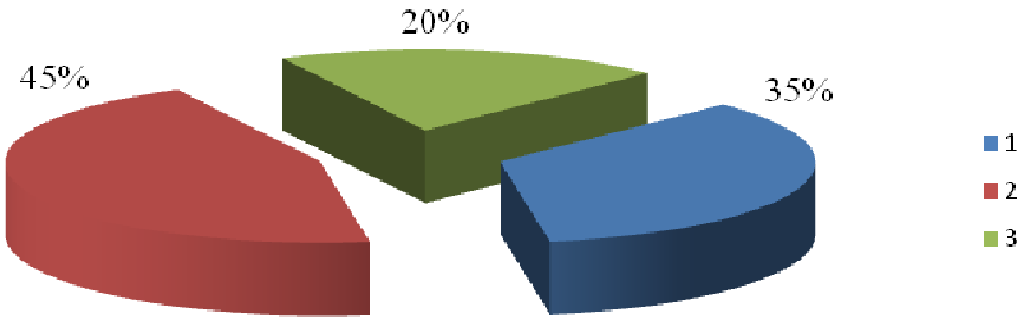


Рисунок 1.1 – Диаграмма распределения двигателей по сериям в сельском хозяйстве: *1* – АД первой и второй серий; *2* – серий 4А и 4АМ; *3* – АД других серий

В ходе исследования было установлено, что на животноводство и подсобные предприятия приходится около 80 % от общего числа электродвигателей, эксплуатируемых в различных отраслях сельского хозяйства [7, 8, 48, 57]. До 90 % двигателей закрытого исполнения общепромышленного назначения и 1 – 3 % серии ДА...С и АО2...СХ эксплуатируются на молочных фермах. При этом большинство животноводческих комплексов почти полностью оснащены двигателями серии 4А [15, 109].

Таким образом, примерно половину парка электродвигателей в сельском хозяйстве составляют асинхронные электродвигатели четвертой единой

серии общепромышленного применения, которые наименее всего приспособлены для работы в условиях агропромышленного комплекса страны.

1.2 Анализ факторов, влияющих на интенсивность протекания процессов старения и восстановления изоляции двигателей

Комплексные исследования условий и особенностей работы двигателей в сельском хозяйстве позволили установить приоритеты в ряду факторов, воздействующих на электрическую изоляцию с момента начала эксплуатации и заканчивая списанием [43]. Тогда процессы изменения свойств изоляции обмоток в результате ее старения и восстановления под действием эксплуатационных факторов различной природы могут быть представлены в виде некоторого объекта исследования, изображенного на рисунке 1.2 [13].

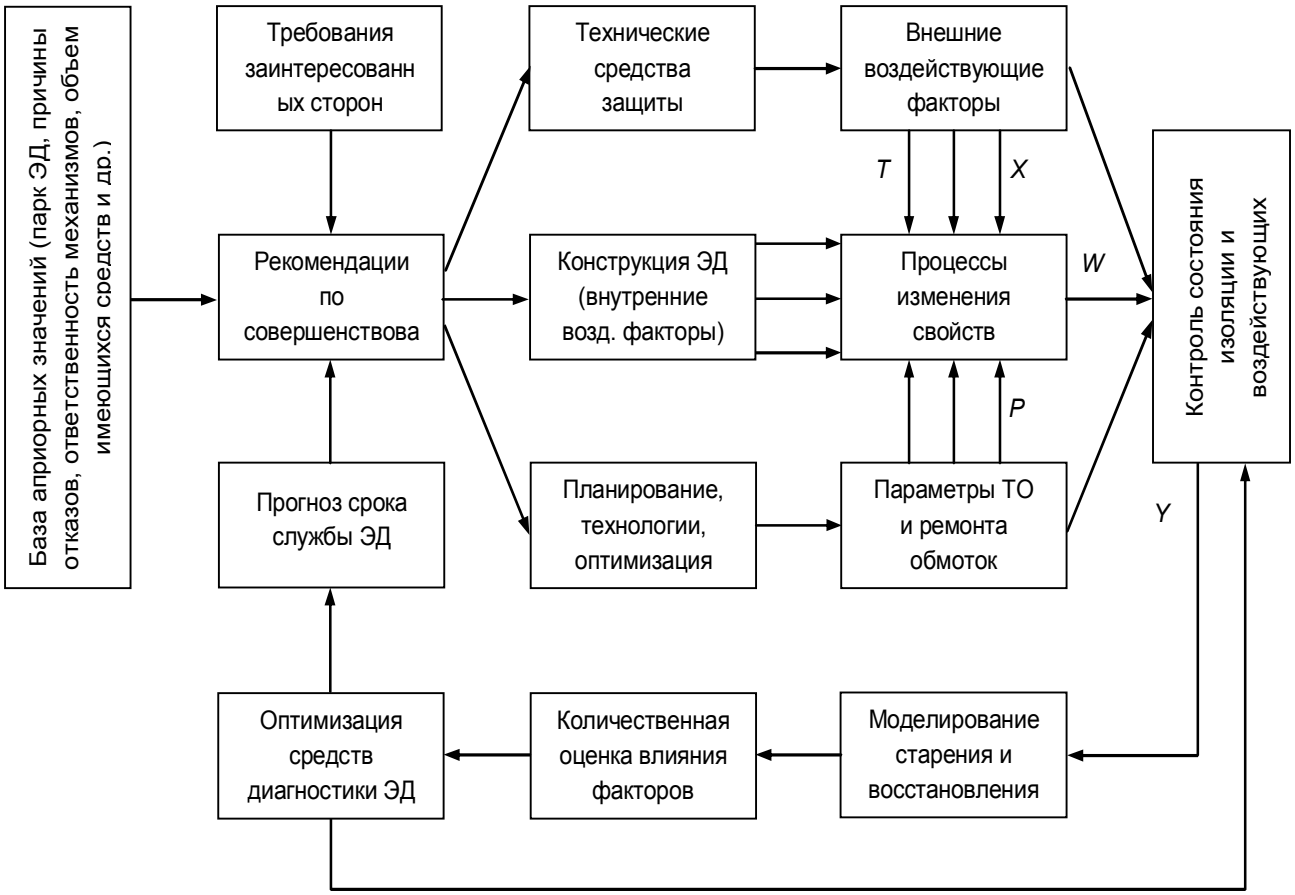


Рисунок 1.2 – Структура предлагаемой системы повышения надежности ЭД

1.2.1 Причины повреждений изоляции электрических двигателей и статистика выходов их из строя

В процессе эксплуатации в условиях сельскохозяйственного производства электрические двигатели взаимодействуют с окружающей средой, и повреждения изоляции часто являются следствием этого взаимодействия. При этом в зависимости от характера среды, ее воздействие на изоляционные материалы различно [42].

Так, в частности, изоляция, находящаяся на открытом воздухе, подвержена воздействию солнечных лучей, изменений атмосферных условий (температуры, давления, влажности воздуха), различных газов, минеральной и органической пыли, а также микробиологическому, биологическому и иному влиянию [48, 60, 61, 63].

Анализ результатов исследований, проведенных в Сибири, на Урале, средней полосе и в других областях России [9, 60 – 63, 110], показал, что исполнение асинхронных двигателей общепромышленного назначения во многих случаях не соответствует условиям среды сельскохозяйственных помещений. Кроме того, показатели микроклимата большинства животноводческих помещений превышают официальные зооветеринарные нормы, что в значительной мере влияет на срок жизни изоляции – агрессивные газы могут химически взаимодействовать с изоляционным материалом, что приводит к ускоренному снижению его электрической прочности [47].

Следует отметить отрицательное влияние, оказываемое на изоляцию в процессе ее восстановления, когда материалы подвержены сильным механическим нагрузкам и велика вероятность попадания химических примесей в материал. Например, канифоль, применяемая при пайках, а также некоторые компоненты, входящие в состав защитных мазей для рук, крепежные материалы и т. д., могут вызвать серьезные повреждения изоляции обмоток [111]. Большинство применяемых в настоящее время способов разрушения связующего обмоток сопровождаются выделением токсичных веществ, вызывающих коррозию металла, изменение размеров конструкции и другие дефекты, приводящие к значительному снижению к. п. д. двигателей, а при механическом способе извлечения обмотки ЭД повреждается наружная поверхность электротехнической стали. В свою очередь, сушка обмоток электрических двигателей в большинстве случаев осуществляется в сушильных печах, не позволяющих следить за температурным режимом, что сводит на нет все усилия по повышению качества выполнения ремонтных работ. Результатом подобного ремонта является уменьшение времени работы двигателя до 2 – 3 мес.

Таким образом, воздействия, вызывающие повреждение электроизоляционных материалов, оказывают влияние на состояние изоляции электродвигателя не только в процессе выполнения им требуемых функций, но и в ходе технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортировки. Более того, выход ЭД из строя обусловлен как уровнем и сочетанием воздействующих факторов, так и конструкцией и техническим состоянием его элементов [38]. В общем виде причины, вызывающие повреждение изоляции, можно разделить, что подтверждают и результаты ранее выполненных исследований [112], на следующие группы:

– влияние окружающей среды;
– тепловые воздействия;
– механические воздействия;
– электрические воздействия.

Одной из отличительных особенностей эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве является сезонность их работы. Так, ЭД животноводческих ферм работают лишь в стойловый период, задействованные на орошении и на агрегатах сушки трав – в летнее время, а на обработке зерна – в период уборки. Кроме того, достаточно распространенным явлением в сельскохозяйственном производстве являются длительные простои технологического ЭО, вызванные выходом двигателей из строя. При этом значительная часть простоев продолжительностью от 8 ч до 2 суток приходится на потребителей первой и второй категории надежности, что значительно превосходит предельно допустимые значения перерывов [4, 9, 65].

Наряду с сезонностью, крайне важным следует признать сочетание режима работы электродвигателя с отрицательным воздействием на изоляционные материалы окружающей среды. В случае длительных простоев технологического электрооборудования в среде с высокой относительной влажностью изоляция обмоток электрических двигателей подвергается периодическому увлажнению, а ее сопротивление уменьшается до 0,5 МОм. Кроме того, из расчетных и опытных данных [10] следует, что повышение температуры окружающей среды вызывает ухудшение охлаждения двигателей и приводит к росту потерь в обмотке. В частности, у подвергшихся испытанию ЭД превышение температуры обмотки составляет, в среднем, 8 °С на каждые 10 °С увеличения температуры окружающей среды [113, 114]. Очевидно, что кроме влияния материала изоляции на описанный процесс необходимо учитывать воздействие технологии ее изготовления, а также пропитки и сушки обмоток [111].

Опыт эксплуатации технологического электрооборудования на сельскохозяйственных предприятиях страны [49, 66, 86, 87, 115, 116] показал

существенное влияние вибрационных процессов на надежность двигателей общепромышленных и специальных серий. Анализ данных [4, 6, 115], полученных при измерении вибрационной скорости статора в установившемся режиме, позволил сделать вывод о том, что диапазон вибрации электродвигателей в сельскохозяйственном производстве гораздо шире предусмотренного техническими условиями и для различных производственных процессов (кормоприготовление, доение, вентиляция и др.) превышает предельно допустимый в 2 – 8 раз.

Еще одной из характерных особенностей эксплуатации электрических машин в сельском хозяйстве является низкое качество питающего напряжения. Из-за значительной протяженности сельских сетей, наличия большого количества однофазных потребителей и неравномерного их распределения по фазам в электрических сетях имеет место значительная несимметрия напряжения (от 0,3 до 2,5 %), а также его серьезные колебания (от – 25 до 20 % от номинального).

Таким образом, все перечисленные особенности эксплуатации и ремонта электродвигателей в условиях сельскохозяйственного производства в той или иной степени оказывают влияние на надежность их работы.

Анализ количественных показателей выхода ЭД из строя позволил получить достаточно адекватную картину сложившейся на сегодняшний день в агропромышленном комплексе России ситуации по отказам электрооборудования. Так, в настоящее время более 60 % отказов электродвигателей приходится на время их напряженной работы (посевная и уборочная компании). При этом убытки от простоя каждого ЭД составляют от 300 до 10000 руб. в сутки [117]. Кроме того, возникают ситуации, когда отказавший электрический двигатель, установленный на ответственном технологическом оборудовании, не имеет регламентированного системой ППР подменного резерва, а на расчетном счете хозяйства отсутствуют средства для его оперативного ремонта. Как следствие, убытки от отказа двигателя значительно превосходят стоимость нового ЭД и наносят хозяйству значительный экономический ущерб.

Для оценки динамики отказов электродвигателей при непосредственном участии автора были проведены статистические исследования по сопоставлению аварийности ЭД во времена СССР, когда действовала система ППР, и в настоящее время. Для удобства выполнения данных исследований была выбрана группа хозяйств, функционирующих со времен СССР. Информация по отказам двигателей за 2009 г. приведена в таблице 1.1, а аналогичные показатели 1988 г. сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.1 – Количество вышедших из строя электродвигателей в ряде хозяйств Алтайского края за 2009 г.

Наименование предприятия	Количество установленных ЭД	Количество отказавших ЭД	В % от числа установленных
ЗАО «Белоярское»	38	6	16
Колхоз «Заря»	127	32	25
ЗАО «Бурановское»	86	10	12
Ащегульское коллективное сельхозпредприятие	91	9	10
ОАО «Великий октябрь»	158	41	26
Совхоз «Зеленый клин»	164	37	23
КГУП «Центральный»	152	24	16

Таблица 1.2 – Количество вышедших из строя электрических двигателей в ряде хозяйств Алтайского края в 1988 г.

Наименование предприятия	Количество установленных ЭД	Количество отказавших ЭД	В % от числа установленных
Колхоз «Белоярский»	49	4	8
Колхоз «Заря»	162	26	16
Совхоз «Бурановский»	144	12	8
Совхоз «Ащегульский»	87	5	6
Колхоз «Великий октябрь»	236	32	14
Совхоз «Зеленый клин»	179	20	11
Колхоз «Центральный»	260	18	7

Анализ полученных данных показал, что, несмотря на сокращение парка двигателей за период с 1988 по 2009 гг., процент их выхода из строя увеличился, в среднем, в 2 раза. В свою очередь, согласно [118], за аналогичный период стоимость ремонта ЭД относительно стоимости нового электродвигателя возросла с 19 – 20 % до 28 – 30 %. Все это привело к тому, что затраты на ремонт электрооборудования увеличились, в среднем, в 3 раза. Другими словами, эффективность организации технического обслуживания и ремонта электрооборудования в агропромышленном комплексе России и стран СНГ на сегодняшний день является неудовлетворительной.

Исследования надежности электродвигателей общепромышленного назначения [4, 9, 108, 119] показывают, что на сельскохозяйственных предприятиях ежегодно по тем или иным причинам выходят из строя 20 – 30 % ЭД, а их

средний срок службы не превышает 3 лет при расчетном ресурсе 8 – 10 лет [120]. По данным многих исследований [1, 14, 107, 121 – 124], действительный срок службы изоляции составляет, в среднем, 2 – 4 года для новых машин и от полугода до полутора лет для подвергшихся ремонту (рисунок 1.3).

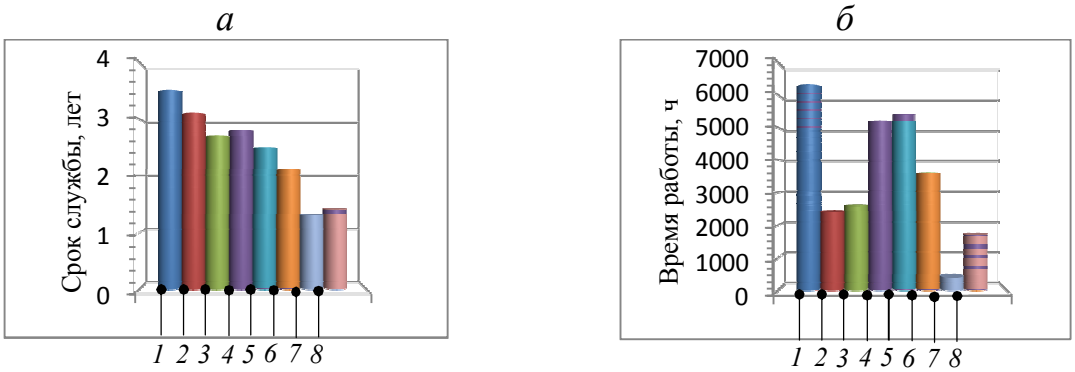


Рисунок 1.3 – Срок службы (*а*) и средняя продолжительность работы ЭД (*б*):
1 – металлообработка; *2* – зерноочистка; *3* – кормоприготовление; *4* – вентиляция; *5* – водоснабжение; *6* – доение; *7* – кормораздача; *8* – уборка навоза

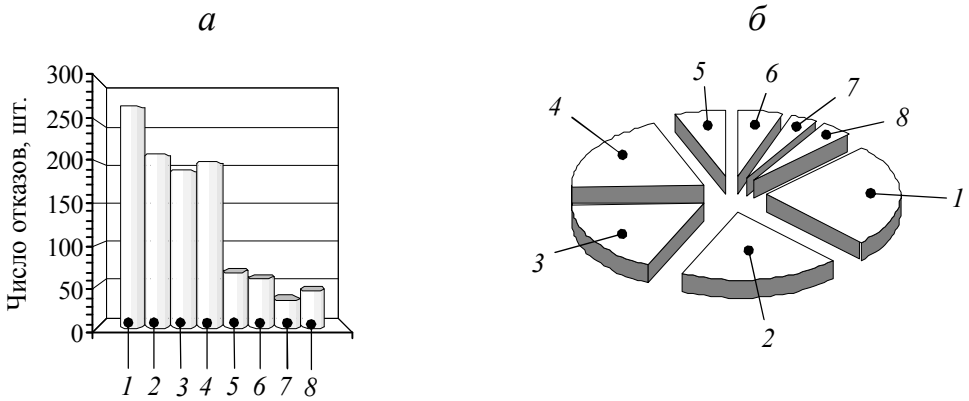


Рисунок 1.4 – Число (*а*) и процентное соотношение (*б*) отказов электродвигателей: *1* – кормоприготовительные машины (26,4 %); *2* – транспортеры навозоуборочные (20,8 %); *3* – вакуумные насосы доения (18,8 %); *4* – вентиляторы (20,1 %); *5* – насосы водяные (6,5 %); *6* – оборудование механических мастерских (5,8 %); *7* – оборудование растениеводства (3,3 %); *8* – машины для обработки молока (4,2 %)

Анализ результатов исследований причин выхода электродвигателей из строя позволил дифференцировать отказы следующим образом: эксплуатационные – около 50 %, технологические – около 35 %, конструкционные – около 15 %, а результаты обработки статистических данных о повреждениях обмоток двигателей [4, 65], в свою очередь, показали, что отказы ЭД происходят из-за

создания аварийных режимов – около 70 %, старения изоляции и износа узлов – около 30 % (рисунок 1.4). С точки зрения теории надежности как «слабые звенья» выделены следующие элементы конструкции двигателей [7, 8, 125]: обмотка статора – повреждения составляют около 80 %, подшипниковый узел – около 15 %; ротор – около 5 % от общего числа отказов ЭД.

Говоря о причинах, вызывающих преждевременный выход электродвигателей из строя, следует обратить внимание на то, какие виды дефектов они чаще всего вызывают и насколько последние серьезны.

Основными видами повреждений электрических машин являются многофазные короткие замыкания в обмотке статора, однофазные замыкания обмотки статора на землю, двойные замыкания на землю, замыкания части витков в одной фазе обмотки статора [126]. В 80 – 95 % всех случаев неисправной оказывается обмотка статора, причем около 70 % повреждений приходится на фазовую и лобовые части, а остальные 30 % составляют перекрытия и пробои изоляции в коробках выводов.

Межфазные и витковые повреждения не так часты, однако имеют тяжелые последствия: дуга, возникающая в месте повреждения, обычно приводит к пожару в электродвигателе, уничтожающему значительную часть обмотки, и выплавлению активной стали, а динамические воздействия приводят к деформации лобовых частей. Однофазные замыкания обмотки статора на землю являются наиболее распространенным видом повреждений и происходят, во-первых, в связи с естественным старением изоляции, а, во-вторых, из-за пробоя в результате перенапряжений [127]. Степень опасности замыкания на корпус оценивается по объему выплавленной стали статора электрического двигателя и вероятности перехода однофазного замыкания в витковое или многофазное [128].

Аварии электрических двигателей подразделяются на два основных типа: механические и электрические [11, 126, 129 – 130]. Причинами большинства механических аварий являются: радиальные вибрации из-за асимметрии питающей сети (75 – 80 %), механические перегрузки на валу ЭД (10 – 15 %), брак комплектующих элементов или брак, допущенный при сборке, обслуживании и ремонте (5 – 10 %) [131].

Значительная часть механических аварий носит скрытый характер и выявляется только после соответствующих испытаний или разборки электродвигателя, однако постоянный контроль сетевого напряжения и нагрузки на валу ЭД позволяет, в большинстве случаев, свести вероятность возникновения аварии к минимуму [67, 132].

В свою очередь, электрические аварии подразделяются на четыре типа [133]:

- сетевые аварии, связанные с авариями в питающей электросети;
- токовые аварии, связанные с обрывом проводников в обмотках статора, ротора или кабеля, межвитковым и межфазным замыканиями обмоток, нарушением контактов и разрушением соединений, выполненных пайкой или сваркой;

– аварии, приводящие к пробою изоляции в результате нагрева, обусловленного протеканием токов перегрузки или короткого замыкания;
– аварии, связанные со снижением сопротивления изоляции вследствие ее старения, разрушения или увлажнения.

Данные статистики подтверждают тот факт, что до 80 % аварий двигателей напрямую или косвенно связаны с авариями сетевого напряжения [82, 134]. Более того, вероятность пробоя изоляции возрастает на порядок, если ее сопротивление в 2 раза меньше допустимого (0,5 МОм). При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления такой тяжелейшей аварии ЭД, как пробой обмотки статора на корпус, опасной не только для двигателя, но и обслуживающего персонала [11, 12].

Проведенный анализ статистических данных причин выхода электродвигателей из строя позволил сделать вывод о том, что значительную их долю составляют отказы ЭД, вызванные старением изоляции обмоток статора под воздействием таких факторов, как влага, агрессивные газы, тепловые и механические нагрузки [122]. Своевременная оценка технического состояния электрических двигателей, а также обеспечение высокого качества восстановления работоспособности ЭД позволят максимально снизить спрос на ремонтную услугу за счет повышения надежности их узлов и повысить уровень производства в целом по сельскому хозяйству.

1.2.2 Методы и технические средства восстановления работоспособности электродвигателей в процессе эксплуатации и ремонта

Как уже упоминалось, в процессе эксплуатации изоляция электродвигателей, как наиболее «слабый» и уязвимый элемент конструкции ЭД, подвергается различным воздействиям, под влиянием которых происходит как ее старение, так и восстановление. Следуя принципам системного анализа, рассмотрим основные и наиболее значимые процессы, определяющие качество изоляции и формирующие методы поддержания и восстановления работоспособности электрических двигателей [43].

На рисунке 1.2 приведена структура системы повышения надежности электродвигателей, которая позволила выделить ряд проблем научно-исследовательского и прикладного характера, связанных с обеспечением надежности технологического оборудования, эксплуатируемого в условиях сельского хозяйства. Наиболее важной из них является проблема повышения надежности изоляции ЭД, в первую очередь витковой, путем увеличения ее нагревостойкости, влагостойкости, электрической и механической прочности. Важное место при этом отводится изучению процессов пропитки и сушки обмоток, выявлению перспективных направлений интенсификации данных процессов и созданию прогрессивной электротехнологии [135].

Рассматривая в совокупности процесс восстановления изоляции электродвигателей при их обслуживании и ремонте на сельскохозяйственных предприятиях, можно выделить ряд основных задач, которые необходимо решать при его реализации:

- осуществление разрушения связующего без изменения физико-механических свойств статора и обмоточного провода;
- обеспечение высокого качества пропитки и сушки обмоток электродвигателей;
- сокращение времени пропитки и сушки изоляции статорных обмоток;
- снижение энергоемкости процесса и соблюдение требований экологии;
- обеспечение безотходности технологического процесса пропитки и сушки.

Как видно, процесс восстановления изоляции обмоток электрических двигателей может быть условно представлен в виде четырех последовательно выполняемых взаимосвязанных этапов:

- разрушения связующего обмоток и проведения обмоточно-изолировочных работ;
- предварительного нагрева и сушки обмоток ЭД, обеспечивающих создание благоприятных условий для выполнения последующих технологических операций;
- пропитки статорных обмоток с наиболее полным заполнением пропитывающим составом пор, капилляров и трещин межвиткового пространства двигателя;
- сушки после пропитки для удаления жидкости из тела обмотки и полимеризации лаковой основы с обеспечением ее однородности и монолитности.

Далее, следуя установленному сценарию, проанализируем систему возможных решений выявленной проблемы. Согласно принципам системного анализа, локализуем поставленную проблему низкого качества изоляции путем более детального рассмотрения основных и наиболее значимых процессов, определяющих качество изоляции и формирующих методы поддержания и восстановления работоспособности ЭД.

1.2.2.1 Способы разрушения связующего обмотки двигателя при его капитальном ремонте

Методы извлечения обмотки из пазов статора (кроме механического способа), используемые в практике ремонтных предприятий, требуют размягчения или разрушения слоя связующего, пропитывающего изоляцию и скрепляющего обмотку с железом статора электродвигателя. Как правило, применяемые в настоящее время способы разложения связующего используют механизмы термоокислительной или химической деструкции [136].

Термоокислительная деструкция сетчатых полимеров, протекающая при рабочей температуре 290 – 320 °С и сопровождающаяся выделением большого количества токсичных веществ, вызывает коррозию металла, изменение размеров конструкции, приводит к значительному снижению к. п. д. двигателей и другим дефектам [137, 138].

В свою очередь, химической деструкцией называют совокупность химических процессов, приводящих под действием агрессивных сред к изменению химической структуры полимера. По характеру действия агрессивные среды разделяются на две группы: среды, вызывающие обратимые изменения, и среды, под действием которых происходят необратимые изменения полимеров. Химически агрессивные среды, в свою очередь, подразделяются на вещества кислотно-основного характера и вещества, обладающие окислительными свойствами.

Применение для химического разрушения связующего обмоток электрических двигателей растворов сильных минеральных кислот нежелательно из-за того, что имеющиеся в электродвигателях элементы электротехнической стали легко корродируют. А составы на основе хлорированных углеводородов, алициклических спиртов, аминосодержащих соединений и нефтепродуктов в большинстве своем являются токсичными, и их использование вызывает сложности с захоронением отходов.

Рассмотренные методы разрушения связующего обмоток не отвечают современным требованиям к качеству ремонта двигателей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, экономии изоляционных и проводниковых материалов, экологии, условиям труда ремонтного и обслуживающего персонала.

Вместе с тем, учеными всероссийского научно-исследовательского института электроизоляционных материалов и фольгированных диэлектриков разработан метод гидролитической деструкции связующего (ГДС), основанный на обработке изоляции различными водными перегретыми растворами [136]. Применение указанного метода при ремонте электрических машин переменного тока мощностью до 100 кВт в сочетании с последующим механическим удалением обмоток обеспечивает:

- сохранение номинальных параметров электродвигателей;
- уменьшение числа двигателей, списываемых как не соответствующих технологическим условиям по деформации активного железа статора, прослаблению пакета и перешихтовке активного железа статора, деформации корпуса статора, завышению тока холостого хода.

Использование гидролитической деструкции позволяет сохранить обмоточную медь по своим качественным и количественным характеристикам, а также положительно влияет на культуру производства, охрану труда и не оказывает вредных воздействий на окружающую среду. Базовым элементом установок ГДС является автоклав, обеспечивающий требуемую герметичность и снабженный контрольно-измерительными приборами, осуществ-

ляющими контроль и поддержание заданных значений режимных параметров. При этом после отстоя гидролизующие растворы могут быть использованы многократно.

Кроме того, применение рассмотренного метода не приводит к увеличению потерь в активной стали сердечника статора, а используемые материалы исключают вредные выбросы в атмосферу и обеспечивают работу установки по замкнутому циклу. Однако при этом необходимо помнить, что параметры технологического процесса зависят не только от класса нагревостойкости изоляции, типа связующего, конструкции ЭД, но и от конструктивных особенностей автоклава.

1.2.2.2 Методы пропитки и сушки статорных обмоток на этапах обслуживания и ремонта электродвигателей

Одним из важнейших этапов процесса изготовления и ремонта электродвигателей является пропитка уложенной в пазы статора обмотки лаком или компаундом с последующей сушкой и полимеризацией основы лака. При этом пропитывающий состав заполняет воздушные промежутки между проводниками и пазовой изоляцией, а также поры изоляционных материалов, улучшая теплопроводность обмоток за счет уменьшения воздушных прослоек между проводниками и стенками паза сердечника и повышая нагревостойкость и влагостойкость изоляции из-за уменьшения гигроскопичности в результате заполнения пор и создания пленки, препятствующей проникновению влаги внутрь обмотки. Кроме того, увеличивается электрическая прочность изоляции, т. к. электрическая прочность пропиточных материалов выше прочности воздуха, находящегося между волокнами непропитанных материалов, а также механическая прочность изоляции в силу того, что пропитанная обмотка имеет хорошо сцементированные витки, плотно сидящие в пазах сердечников.

Для пропитки обмоток, в зависимости от их типа и габаритов двигателей, лаками на основе растворителей используют следующие методы: погружение в лак, метод Зондероля, пропитка на стендах с нижней подачей лака, ультразвуковой, наложение электрического поля, вакуумно-нагнетательный [32, 101, 139 – 145].

Среди названных методов пропитка погружением получила наибольшее распространение как для отдельных катушек, так и обмоток, уложенных в пазы сердечников. Для лучшего проникновения лака в обмотку, сердечник перед погружением в лак нагревают до температуры 60 – 70 °С. При этом на удаление растворителей в процессе сушки затрачивается 10 – 12 ч, что приводит к вытеканию большей части лака из обмотки, вследствие чего изделия приходится пропитывать 2 – 3 раза. В свою очередь, применение метода Зондероля позволяет сократить время сушки после пропитки до 1 – 2 ч. Кроме того, более густой лак, чем при обычной пропитке, меньше вытекает из обмотки при сушке, вследствие чего изделие можно пропитывать один раз.

Недостатками метода пропитки погружением являются большой расход лака за счет покрытия им металлических деталей, а также образование на наружной поверхности статора трудно смываемой лаковой пленки, ухудшающей качество покрытия при окраске. Более того, выделяемые пары разбавителей и растворителей приводят к загазованности пропиточно-сушильных отделений, делая их взрыво- и пожароопасными и вредными для здоровья находящегося в них технического персонала.

Таким образом, рассмотренный метод при всей его простоте и доступности не обеспечивает необходимого качества пропитки (коэффициент пропитки не превышает 0,3), трудоемок и отличается наиболее вредными условиями труда.

При использовании метода пропитки на стендах с нижней подачей лака сокращается расход лака вследствие того, что он покрывает, главным образом, пропитываемые обмотки и излишне не расходуется. Кроме того, меньше загрязняется пропиточный состав, т. к. лак не соприкасается с наружной поверхностью изделий, которая не всегда бывает чистой, а также у статоров замывается только одна посадочная поверхность, которая при пропитке находится внизу бачка. Резкое уменьшение загазованности создает благоприятные условия для работы в пропиточных отделениях.

Тем не менее, данный метод отличается малой производительностью, низким качеством, необходимостью выполнения работ по замазыванию замазкой отверстий в статоре для предохранения от вытекания лака при пропитке.

Ультразвуковой метод, метод наложения электрического поля [144], вакуумно-нагнетательный метод [142, 146] более эффективны, но, в конечном счете, также не обеспечивают требуемого качества пропитки, сложны в реализации, что затрудняет, а в ряде случаев исключает их использование на ремонтных предприятиях.

В свою очередь, для пропитки обмоток ЭД лаками без растворителей применяют капельный метод. Изделия, пропитанные составом без растворителя, имеют меньшее время полимеризации лака и при нагревании быстро высыхают, их обмотка монолитна и хорошо сцементирована. Кроме того, капельный метод позволяет автоматизировать процесс пропитки и сушки, а также снизить трудоемкость процесса.

Таким образом, независимо от используемого метода, режим пропитки зависит от назначения электрической машины, конструкции обмоток и типа лака, а применяемая в промышленности механизация и автоматизация процессов пропитки и сушки стала важнейшим средством повышения производительности труда в сельском хозяйстве и создания для персонала благоприятных условий работы. Перечисленные выше методы имеют определенные преимущества, но все они не лишены отмеченных серьезных недостатков, связанных с большой длительностью процесса пропитки, слабым проникновением лака в обмотку, большим расходом лака, сложностью технологиче-

ского оборудования, раздельным выполнением технологических операций пропитки и сушки, что делает их экологически вредными.

В то же время, сушка обмоток электрических двигателей, как правило, осуществляется в специальных сушильных печах. Ее длительность зависит от химического состава и физических свойств изоляционных материалов, конструкции изоляции обмотки, габаритов изделия, степени увлажнения изоляции, способа сушки, мощности сушильного оборудования, применяемого для пропитки лака.

Процесс сушки после пропитки разделяют на две стадии: удаление паров растворителя и запекание лаковой пленки, и реализуют следующими основными способами: конвекционным, терморадиационным, индукционным, токовым [33, 101, 140, 147]. В условиях мелкосерийного производства для сушки статорных обмоток ЭД наибольшее распространение получил конвекционный метод.

При конвекционном способе сушки изделия помещаются в тупиковые сушильные печи, в которых тепло передается циркулирующим в печи нагретым воздухом, проходящим через электрокалорифер. При этом пленка, образующаяся на поверхности изделия, препятствует испарению растворителя из внутренних слоев обмотки, что делает данный метод сушки наиболее длительным. Терморадиационный способ заключается в нагреве изделий инфракрасными лучами, генераторами которых служат специальные электрические лампы, а также трубчатые электронагревательные элементы и специальные металлические панели, нагретые до температуры 300 – 450 °С, излучающие инфракрасные лучи. Данный способ сушки более эффективен, чем конвекционный, т. к. пропиточный состав нагревается снизу от металлических частей элементов конструкции электродвигателя, что сокращает время сушки в 5 – 6 раз, а удельный расход электроэнергии – в 2 раза.

В свою очередь, при индукционном способе сушки для нагрева изделий используют явление магнитной индукции. Процесс сушки данным способом протекает интенсивно изнутри вовне, что создает благоприятные условия для удаления растворителя и высыхания лаковой пленки. Применение индукционного нагрева при сушке обмоток статоров, пропитанных водоэмульсионным лаком, сокращает время сушки до 30 мин и дает возможность создать непрерывное производство, связывающее операции пропитки и промывки с сушкой. При токовом способе сушки через обмотки ротора, статора или якоря, пропитанные лаком, не содержащим горючих и взрывоопасных растворителей, пропускается электрический ток, и являющийся причиной нагрева изделий. Практика применения такого способа сушки на ремонтных предприятиях России и стран ближнего зарубежья показала, что экономия времени по сравнению с конвекционной составляет 80 – 90 %, электроэнергии 70 – 80 %, а процесс сушки ускоряется в 5 – 7 раз [148, 149].

Таким образом, как показали результаты анализа, индукционный, токовый и терморадиационный способы сушки создают благоприятные условия для удаления паров растворителей, поскольку сначала нагревается металл

изделий, и могут быть успешно использованы при разработке и создании новых современных технических средств восстановления изоляции обмоток электродвигателей.

1.2.2.3 Перспективные направления развития методов восстановления изоляции электрических двигателей

Как установлено, ресурс электрического двигателя определяется, прежде всего, эффективностью выполнения технологических операций при его производстве или капитальном ремонте. Однако технологии восстановления изоляции, широко распространенные на ремонтных предприятиях нашей страны, не обеспечивают требуемого уровня качества для электродвигателей, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях сельскохозяйственного производства. В то же время высокоэффективные технологии, значительно повышающие эксплуатационную надежность ЭД, распространения не получили вследствие своей дороговизны и иных причин [145]. Кроме того, состояние дел в области ремонта двигателей сейчас таково, что операции пропитки и сушки обмоток независимо от применяемых методов и способов разделены с обязательной сменой места и условий их выполнения [32, 33, 101, 139 – 157].

Разработанный в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» при непосредственном участии автора метод восстановления работоспособности ЭД в процессе обслуживания и ремонта по замкнутому циклу исключает возможные перемещения и заключается не в доставке изделия к источнику тепла и пропитывающему составу, а, наоборот, в подаче тепла и пропитывающего состава в сосуд, где изделие находится постоянно без каких-либо перемещений [1, 4]. При этом в основу предлагаемого метода пропитки и сушки положена идея создания градиентов массосодержания и давления между группой сообщающихся сосудов [47, 68, 158 – 161].

Данный универсальный метод предполагает использование вакуумной технологии, однако имеет существенные с ней различия и позволяет изменять в широком диапазоне такие технологические параметры, как время и температуру нагрева обмоток, градиент и скорость изменения давления. В то же время, несмотря на достигаемые положительные результаты при использовании высокоэффективного метода электротермовакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки электродвигателей по замкнутому циклу, качественный ремонт ЭД не является достаточным. На этапе нормальной эксплуатации роль основного мероприятия по обеспечению надежной работы двигателей отводится их комплексной диагностике. При этом решение задачи разработки эффективных методов диагностики и прогнозирования технического состояния электрической изоляции строится на основе применения современных технических средств и многофакторных моделей ее старения с последующим определением рациональных сроков проведения профилактических мероприятий и ремонтов.

1.3 Состав и основные элементы предлагаемой системы повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве

Результаты многочисленных исследований позволили выявить и представить в виде элементов блок-схемы (рисунок 1.2) нижеследующие основные задачи повышения надежности электродвигателей в агропромышленном комплексе, в частности, изоляции обмоток статора, установить основные связи между ними, а также учесть взаимодействие полученной системы с внешней средой [13, 43, 162].

1 Повышение качества и интенсификация пропиточно-сушильных работ. Как уже отмечалось, в настоящее время ресурс электродвигателя определяется, в первую очередь, эффективностью выполнения технологических операций при его производстве или капитальном ремонте. Для изоляции обмотки данной электрической машины такими операциями являются их пропитка и сушка. Технологии восстановления изоляции, широко распространенные на ремонтных предприятиях нашей страны, не обеспечивают требуемого уровня качества для двигателей, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственного производства, продолжительны, энергоемки, экологически небезопасны. Высокоэффективные технологии, при использовании которых возможно значительное повышение надежности ЭД, на сегодняшний день распространения не получили вследствие дороговизны и иных причин. Другой проблемой является вопрос оценки качества пропиточно-сушильных работ, которую невозможно осуществить без наличия достоверного метода пооперационной диагностики [1].

Существующие методы испытаний, такие как измерение сопротивления корпусной изоляции и испытание межвитковой изоляции повышенным напряжением, позволяют лишь грубо произвести отбраковку некачественно отремонтированных электродвигателей. При этом большое значение имеет человеческий фактор субъективности суждения о состоянии ЭД. Следствием этого является существенное количество приработочных отказов. Поэтому, существует необходимость ужесточения контроля качества производимых работ при изготовлении и ремонте ЭД с целью своевременного предотвращения негативных последствий преждевременных выходов электродвигателей из строя на начальном этапе их эксплуатации.

2 Комплексная диагностика электродвигателей в условиях эксплуатации и ремонта и прогноз их состояния на перспективу. Какими бы совершенными ни были технологии проектирования, изготовления и ремонта узлов электродвигателей, в ходе эксплуатации техническое состояние последних под воздействием неблагоприятных внешних и внутренних факторов ухудшается, что, в конечном итоге, приведет к выходу ЭД из строя [163]. Поэтому, чтобы избежать нежелательных последствий отказа конструктивных элементов двигателя, необходимо следить за их техническим состоянием, а также осуществлять контроль обеспечиваемого качества при изготовлении и ремонте. В этой связи, разработке новых методов и средств

диагностики, а также совершенствованию существующих методик оценки состояния узлов оборудования должно уделяться особое внимание. И наоборот, достоверное и своевременное определение технического состояния электродвигателя будет иметь положительный эффект только в случае применения современных, экологически чистых, энергоемких технологий, обеспечивающих высокое качество изготовления и ремонта ЭД [2].

Таким образом, решение этой достаточно сложной проблемы возможно только на основе комплексного подхода. Так, например, с одной стороны требуется создание и внедрение устройств, позволяющих получать полную и достоверную информацию о состоянии изоляции обмотки, а с другой стороны необходимы методики прогнозирования и оптимизации, позволяющие выявлять целесообразность и объем технического обслуживания и ремонта ЭД. В связи с вышеизложенным, наибольший интерес представляют устройства, выполняющие функции автоматической диагностики двигателей, входящие в состав стандартных средств защиты, которые не только способны предотвратить преждевременный выход двигателя из строя, но и позволяют оценить текущее состояние изоляции обмотки, сделать прогноз состояния на будущее и приближенно определить остаточный ресурс. При этом не исключается возможность усложнения конфигурации защитных устройств вплоть до интеграции с системой обработки результатов диагностики на базе ПЭВМ [164].

3 Разработка технических средств измерения и контроля эксплуатационных и диагностических параметров. Эффективное решение задачи повышения достоверности диагностики конструктивных элементов электродвигателя невозможно без технической реализации методов, обеспечивающих получение объективной информации об их состоянии. Кроме того, необходимо проводить постоянную работу в области совершенствования технических характеристик приборов, реализующих существующие методы диагностирования.

Обеспечение современными устройствами диагностики и контроля воздействия внешних и внутренних факторов на обмотку двигателей в процессе их эксплуатации, а также требуемого качества восстановления работоспособности ЭД на стадии технического обслуживания и ремонта позволит получить необходимый уровень надежности узлов электрооборудования и повысить эффективность производства на сельскохозяйственном предприятии в целом.

4 Количественная оценка степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции электрического двигателя. Количественная оценка степени влияния как положительно, так и отрицательно воздействующих факторов на процессы старения и восстановления изоляции ЭД на протяжении всего его жизненного цикла, начиная с момента ввода в эксплуатацию и заканчивая списанием, является основой для прогноза остаточного срока службы электрического двигателя и, как следствие, приня-

тия решений, направленных на повышение эффективности проектирования, эксплуатации и ремонта названного вида ЭО.

5 Создание системы прогнозирования состояния и планирования сроков обслуживания ЭД. Одним из средств повышения надежности электродвигателей в процессе их эксплуатации является система планово-предупредительного ремонта, регламентирующая выполнение в плановом порядке технического обслуживания и ремонта (ТОиР) ЭД после наработки, выраженной определенным количеством часов. Целью регулярного проведения данных мероприятий является сохранение электрооборудования в работоспособном состоянии в течение всего периода эксплуатации и обеспечение его бесперебойной и экономичной работы. При этом проведение ремонтных операций независимо от состояния изоляции обмотки зачастую приводит к перерасходу средств на ремонт, что для предприятий в нынешних условиях хозяйствования с экономической точки зрения крайне не оправданно [2, 107].

Как показали результаты исследования эксплуатационной надежности ЭД, для уменьшения интенсивности отказов при проведении технического обслуживания и ремонта необходимо, наряду с мероприятиями, предусмотренными инструкцией по эксплуатации электродвигателей, определять, не превышают ли параметры элементов двигателей своих допустимых значений и выявлять наличие в них скрытых дефектов. Знание фактического технического состояния ЭД позволяет производить замену тех их элементов, предотказное состояние которых установлено, и устранить причины возможных в последующей эксплуатации неисправностей, увеличивая, таким образом, срок службы электродвигателей [57]. Решение подобного рода задач возможно только на основе комплексного подхода путем создания математического аппарата, позволяющего ответить на вопросы об оптимальных сроках и качестве обслуживания и ремонта каждого электрического двигателя [2].

Таким образом, **целью работы** является создание системы повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве путем разработки методов и технических средств комплексной диагностики, а также теоретического обоснования способа интенсификации процессов тепломассопереноса и практической реализации электротехнологии восстановления изоляции обмоток для обеспечения высокой эффективности сельскохозяйственного производства и улучшения условий труда обслуживающего и ремонтного персонала.

В рамках данной монографии, одной из важнейших задач системного анализа является определение перспективных направлений исследования, для решения которой необходимо составить более подробную и объемлющую структуру разрабатываемой системы повышения надежности, чем это требуется при постановке проблемы и выборе цели. Благодаря системному анализу, из комплекса перечисленных мероприятий выделена задача количественной оценки степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции обмоток статора электродвигателя. Для ее решения необходимо реализовать следующие основные этапы:

– осуществить анализ парка электрических двигателей, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственного производства;
– выявить и проанализировать все воздействующие на изоляцию ЭД факторы в реальных условиях их эксплуатации и ремонта, осуществив их систематизацию;
– построить модель жизненного цикла электродвигателя, обоснованно сократив перечень воздействующих факторов;
– разработать механизм и количественно оценить степень влияния воздействующих факторов на состояние изоляции двигателя в реальных условиях его эксплуатации и ремонта.

Решение задачи количественной оценки степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции обмоток электродвигателей позволило осуществить систематизацию и классификацию всех воздействующих на изоляцию ЭД факторов в условиях их эксплуатации и ремонта, приведенную на рисунке 1.5.

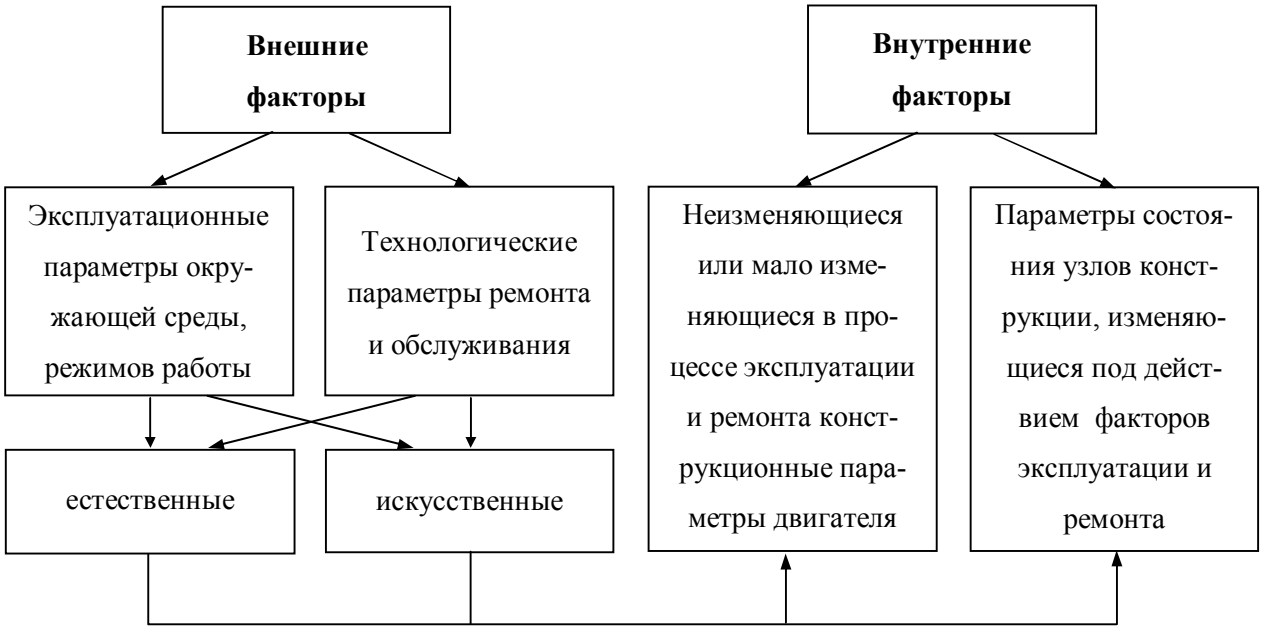


Рисунок 1.5 – Классификация внутренних и внешних воздействующих факторов

При этом для дальнейшего рассмотрения процесса старения изоляции обмоток электродвигателей, а также факторов, замедляющих указанный процесс, был выявлен критерий, по которому воздействующие на объект исследования факторы могли быть отнесены к внешним или внутренним [9]. Тогда, на основании принятого критерия, параметры окружающей среды, режимы работы, а также параметры процесса технического обслуживания и ремонта отнесены к категории внешних факторов, тогда как параметры состояния

электрической изоляции обмоток двигателей необходимо рассматривать как внутренние.

Как известно, в период существования СССР техническое обслуживание и ремонт регламентировались системой государственных и отраслевых нормативов, которые определяли сроки, виды и объемы выполнения соответствующих работ. При этом система планово-предупредительных ремонтов носила затратный характер, не обладала достаточной гибкостью, но обеспечивала эксплуатацию оборудования в соответствии с отраслевыми нормами и стандартами безопасности [165]. В условиях рыночной экономики разработанная во времена СССР система ППР ЭД оказывается неэффективной для сельскохозяйственных предприятий по следующим причинам:

- планирование периодичности и объемов ремонтных мероприятий с использованием данной системы базируется на нормативах заводов-изготовителей и не учитывает их невыполнение из-за отсутствия средств на счете предприятия [166, 167];
- высокие цены на горюче-смазочные материалы делают невозможной транспортировку вышедшего из строя электрооборудования на значительные расстояния и вынуждают хозяйства обращаться к близко расположенным мелким мастерским, нормы технологического процесса на которых зачастую не соблюдаются;
- наводнение отечественного рынка дешевыми импортными продуктами питания требует от предприятий АПК значительного повышения эффективности всего производства, в т. ч. обслуживания и ремонта электрических двигателей, однако система ППР ЭД не позволяет гибко управлять расходованием денежных средств на данный процесс.

При переходе от плановой экономики к рынку предприятия не смогли нести расходы на ТОиР в прежнем объеме, что привело во многих отраслях к постоянному невыполнению планов по ремонтам, потере надежности работы оборудования, старению основных фондов и увеличению ресурсов, необходимых для поддержания работоспособности электродвигателей в будущем [58]. Кроме того, результаты исследований ряда авторов, приведенные в [1, 4], свидетельствуют о том, что ремонты в рамках системы ППР и технического обслуживания электродвигателей в сельском хозяйстве выполняются не всегда на должном уровне. Связано это, наряду с вышеизложенным, с тем, что квалификация обслуживающего персонала на сельскохозяйственных предприятиях не всегда соответствует предъявляемым требованиям. Некоторая часть электриков, занятых на обслуживании электрооборудования, не имеет специального образования, а обеспеченность электромонтерами, как правило, составляет лишь 50 %. Все это говорит о необходимости формирования стройной системы, которая охватывала бы все стадии жизненного цикла двигателя, а также разработки специального комплекса мер, позволяющего проводить необходимые работы с минимальным участием обслуживающего персонала. От

того, насколько правильно и эффективно будет решена данная задача, во многом зависит увеличение срока службы электродвигателей [135].

Представленная на рисунке 1.2 структура системы повышения надежности ЭД содержит модель жизненного цикла изоляции, характеризующуюся тремя группами воздействующих факторов (входов) и двумя выходов [4, 9, 13, 15, 168].

Первая группа входов отражает влияние на процессы старения частично управляемых воздействий: параметров окружающей среды, режимов работы, т. е. внешних воздействующих факторов [17, 47, 163] и характеризуется *n*-мерным вектором

$$X = (x_1, x_2, ..., x_n). \tag{1.1}$$

Другая группа входов определяет возможность возникновения в системе устраняемых, например, с помощью технических средств защиты, аварийных ситуаций и характеризуется вектором случайных неуправляемых воздействующих факторов с обратимыми изменениями в объекте *T*.

Особого внимания заслуживает группа входов *P*, представляющая собой комплекс физических воздействий на изоляцию ЭД с целью ограничения влияния внешних воздействующих факторов и, как следствие, замедления протекания процессов ее старения. Данная группа характеризуется *l*-мерным вектором технологических параметров, определяющих процессы технического обслуживания и ремонта на протяжении всего срока службы электрического двигателя

$$P = (p_1, p_2, ..., p_l). \tag{1.2}$$

Функция состояния изоляции обмотки, ее остаточный или эксплуатационный ресурс, на выходе рассматриваемой системы может быть представлена в общем виде скалярной функцией $W = f(X, T, P)$, определяющей работоспособность двигателя, или в виде *k*-мерного вектора [1, 47, 163, 168, 169]

$$Y = (y_1, y_2, \ldots, y_k), \tag{1.3}$$

которым задается множество диагностических параметров (ДП), измеряемых как в процессе эксплуатации, так и ремонта двигателей, и зависящих от *X*, *T*, *P*, *H*,

где
$$H = (h_1, h_2, \ldots, h_i) \tag{1.4}$$

является вектором составляющих помех на измерительный комплекс, т. е.

$$Y = f_1(X, T, P, H). \tag{1.5}$$

Таким образом, все вышесказанное требует рассмотрения технического обслуживания и ремонта ЭД как важного ресурса в достижении стабильного развития и получения конкурентных преимуществ. Мировой опыт показывает, что внедрение автоматизированных систем управления ТОиР, точно настроенных на бизнес-процессы конкретного предприятия, позволяет [18, 170]:

- сократить расходы на проведение технического обслуживания и ремонта;
- организовать работу по внедрению прогрессивных методов проведения ТОиР;
- наладить взаимодействие всех основных служб и подразделений предприятия;
- уменьшить складские запасы запасных частей и материалов;
- повысить ответственность обслуживающего персонала и уменьшить неблагоприятное влияние человеческого фактора.

Наиболее прогрессивным в рамках рассматриваемой проблемы является предикативный подход к ТОиР или ремонт ЭД «по состоянию» (ПС) [171, 172].

Суть данного подхода состоит в том, что техническое обслуживание и ремонт двигателя ведется, в основном, не в зависимости от времени эксплуатации ЭД, а по его текущему техническому состоянию, контролируемому в процессе эксплуатации без какой-либо разборки или ревизии на базе измерения соответствующих параметров работающего электродвигателя [173]. При этом речь идет о контроле по вторичным параметрам, которые должны удовлетворять определенным требованиям:

- контролируемые параметры должны иметь однозначную количественную взаимосвязь с первичными параметрами технического состояния двигателей;
- измерение параметров должно обеспечиваться простыми портативными техническими средствами, не требующими дополнительной квалификации персонала;
- диапазон изменения контролируемых параметров в процессе работы электрического двигателя от состояния «хорошо» до состояния «недопустимо» должен быть достаточно широким (параметр должен меняться не менее, чем в 15 – 20 раз) для своевременного выявления зарождающихся дефектов и достоверного прогнозирования остаточного ресурса ЭД;
- стоимость выполнения работ по контролю вторичных параметров и время их выполнения должны быть существенно ниже, чем при ревизии двигателей;
- достоверность контроля по вторичным параметрам должна быть не ниже 80 %;

– параметры контроля должны быть универсальны для диагностики одинаковых дефектов однотипного оборудования или его узлов.

Вышеизложенный перечень требований не является исчерпывающим и может дополняться в зависимости от конкретных особенностей электрических двигателей и тех дефектов, которые в них могут появляться.

В рамках альтернативы существующей системе ППР на протяжении всего срока службы электродвигателя требуется вести диагностику и контроль изоляции, позволяющие установить реальное состояние ЭД, и прогнозирование дополнительной наработки до очередного диагностического контроля ($T_{\text{диагн. } i}$). Данный цикл, показанный на рисунке 1.6, повторяется до тех пор, пока по результатам диагностики не потребуется проведения мероприятий по восстановлению изоляции обмоток [174, 175]. При этом следует отметить, что в рамках организационно-технического обеспечения ремонта после проведения технологических операций по восстановлению электрической изоляции необходим диагностический контроль и прогнозирование изменения состояния изоляции статорных обмоток с целью назначения новой наработки до следующей диагностики

$$T_{\text{диагн.}\,i+1} = f\left(X, \Psi_i, \Psi_{i+1}\right), \tag{1.6}$$

где Ψ – обобщенный диагностический параметр, физические основы которого будут рассмотрены в следующем разделе монографии [58].

Указанные меры вызваны отсутствием должного внимания, обусловленного принятой системой планово-предупредительного ремонта [176], к реальному техническому состоянию двигателя, которое в процессе эксплуатации существенно меняется. Так, при достижении электродвигателем наработки, соответствующей времени выполнения технического обслуживания, состояние изоляции обмотки может либо не требовать проведения ТО, либо требовать проведения ремонта. Тогда в первом случае выполнение обслуживания будет сопровождаться затратами, которых можно было бы избежать, а во втором – при невыполнении ТР возможен преждевременный выход ЭД из строя с нанесением существенного ущерба. В рассмотренных случаях своевременный диагностический контроль состояния изоляции позволит избежать указанных трудностей и вовремя провести соответствующие мероприятия, исключив тем самым возможность дальнейшего развития возникших в изоляции дефектов [177].

Предложенная блок-схема алгоритма принятия решения о проведении обслуживания и ремонта электродвигателя включает в себя в соответствии с решаемыми задачами новые, отличные от принятых в действующей системе ППР, элементы, дополняющие и расширяющие возможности данной системы [178, 179].

Таким образом, проведенный анализ состояния проблемы низкой эксплуатационной надежности электродвигателей в сельском хозяйстве позволил предложить систему повышения надежности двигателей, обеспечиваю-

щую достижение поставленных целей путем комплексного решения задач диагностики, прогнозирования технического состояния и восстановления изоляции обмоток на протяжении всего срока службы ЭД [4, 13]. При этом в основе прогноза лежит количественная оценка степени влияния всех воздействующих на изоляцию двигателя факторов.

Наибольший интерес среди элементов рассматриваемой блок-схемы (рисунок 1.6) представляет обобщенный комплекс организационно-технического обеспечения ремонта (КОТОР) и совокупность технических средств и технологий для его реализации, направленных на восстановление работоспособности электродвигателя [170].

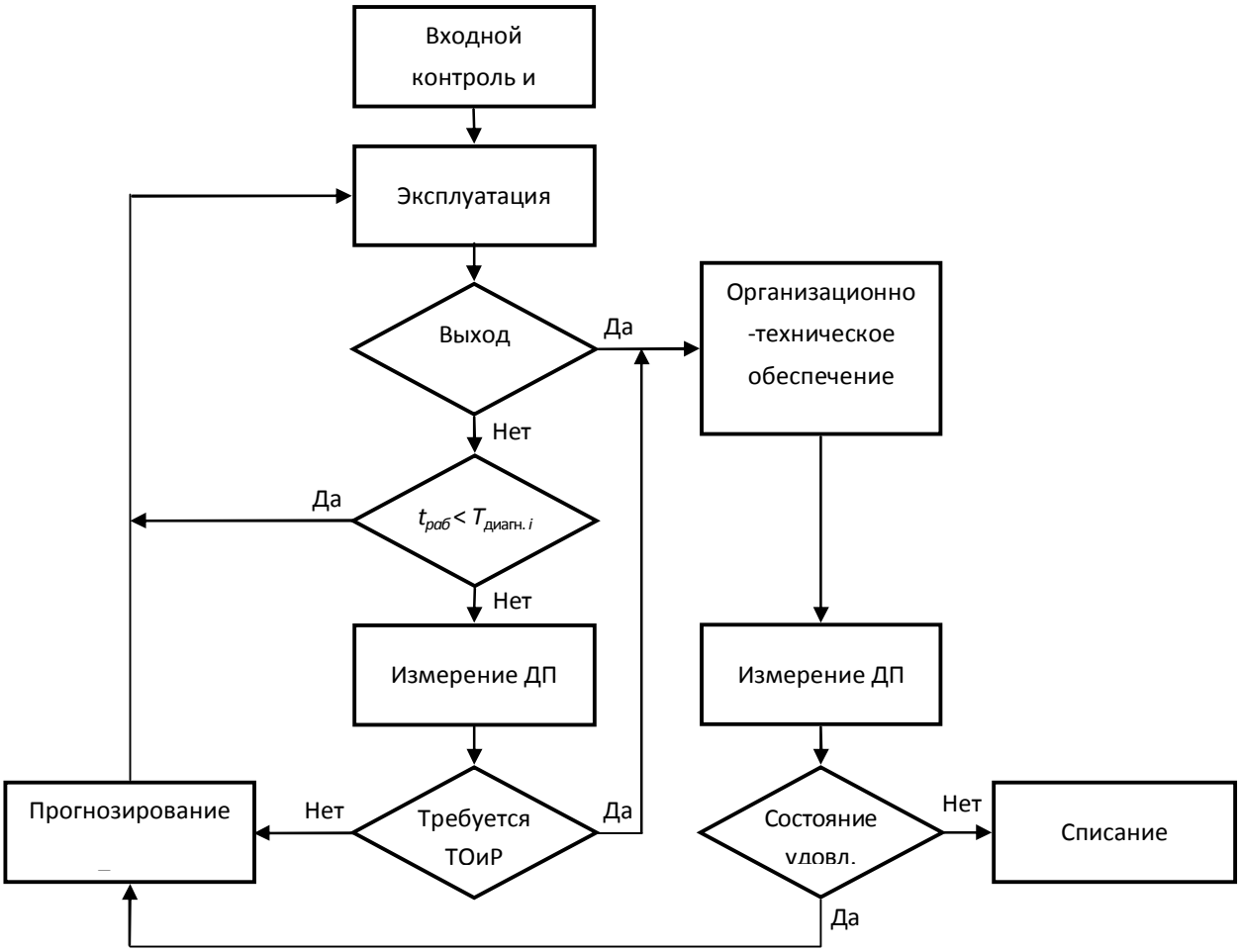


Рисунок 1.6 – Предлагаемая блок-схема процесса принятия решения о проведении обслуживания и ремонта ЭД

Вызвано это тем, что наличие технических средств защиты, назначение которых исключить влияние на ЭД случайных факторов *T*, само по себе не решает проблемы повышения надежности двигателей, хотя такой подход существует в [7, 180], а применение различных методов эксплуатационной и предре-

монтной диагностики состояния изоляции полностью не исключает выход электрических двигателей из строя. Поэтому включение в состав системы повышения надежности электродвигателей рассматриваемой подсистемы предполагает выполнение восстановительных работ по, безусловно, прогрессивной технологии, способной вернуть электрическому двигателю его первоначальные свойства. Это в полной мере и главным образом относится к процессам сушки обмоток и сушки с последующей пропиткой на стадии технического обслуживания или разрушения связующего изоляции, пропитки и сушки отремонтированных обмоток на стадии ремонта, а также к интенсификации указанных процессов и повышению качества выполняемых работ [181, 182].

Тогда, для достижения цели – повышения надежности электродвигателей, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях сельского хозяйства, – необходимо решить комплекс научно-технических задач, где конечным результатом будет создание системы, включающей технологию электротермовакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции статорных обмоток, а также разработка автоматизированных систем оценки их состояния, оптимизации и прогнозирования, позволяющих реализовывать рассмотренные выше принципы [13, 162].

1.4 Количественная оценка степени влияния воздействующих факторов на надежность электрических двигателей

Следуя принципам системного анализа, рассмотрим один из основных методов, лежащих в основе минимизации затрат на техническое обслуживание и ремонт электрических двигателей и прогнозирования дополнительной наработки до очередной диагностики ЭД, позволяющих учесть комплексное влияние как отрицательных воздействий на изоляцию в процессе эксплуатации и ТОиР электродвигателей, так и основных факторов, определяющих продолжительность и качество выполнения восстановительных мероприятий, которым является количественная оценка степени влияния воздействующих факторов на базе математического моделирования.

Тогда на первом этапе исследования построим модель выхода из строя электрических двигателей на основе так называемого «черного ящика», где за X обозначим те связи, которые характеризуют воздействие среды на объект. При этом выходные факторы Y характеризуют воздействие объекта на окружающую среду. Другими словами, выходные связи между объектом исследования и исследователем (выходные или результативные факторы) несут информацию о состоянии и свойствах данного объекта, а также их изменении под влиянием факторов среды (входных факторов).

Как было показано, все входные факторы делятся на внешние – температура окружающей среды, наличие в воздухе агрессивных газов, количество вредных примесей и др., а также внутренние – длительность работы и т. д. В свою очередь, под выходным параметром Y может пониматься следующее:

вероятность безотказной работы, изменение параметров межвитковой изоляции (например, ее сопротивления), наличие отказа, наработка до очередной диагностики и др.

Рассмотрим более подробно построение математической модели с использованием различных математических методов исследования.

1.4.1 Анализ методов описания неопределенностей в задачах мониторинга сложных процессов

Как известно, для описания неопределенностей в задачах автоматического управления используются три метода: вероятностный (стохастический), нечеткая логика, хаотические системы. Наибольший интерес с точки зрения исследуемых процессов старения и восстановления электрической изоляции представляет второй из вышеназванных методов.

Впервые термин «нечеткая логика» (fuzzy logic) был введен американским профессором Лотфи Заде в 1965 г. в работе «Нечеткие множества» в журнале «Информатика и управление». Очевидной областью внедрения алгоритмов нечеткой логики являются всевозможные экспертные системы, в т. ч. :

- нелинейный контроль за процессами (производство);
- самообучающиеся системы, исследование рисковых и критических ситуаций;
- распознавание образов;
- финансовый анализ (рынки ценных бумаг);
- исследование данных (корпоративные хранилища);
- совершенствование стратегий управления и координации действий, например, сложное промышленное или сельскохозяйственное производство.

Простота нечеткой логики как методологии разрешения проблем гарантирует ее успешное использование во встроенных системах контроля и анализа информации. При этом происходит подключение человеческой интуиции и опыта оператора.

В отличие от традиционной математики, требующей на каждом шаге моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей, нечеткая логика предлагает совершенно иной уровень мышления, благодаря которому творческий процесс моделирования происходит на наивысшем уровне абстракции, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей.

Нечеткие числа, получаемые в результате «не вполне точных измерений», во многом аналогичны распределениям теории вероятностей, но свободны от присущих последним недостатков: малое количество пригодных к анализу функций распределения, необходимость их принудительной нормализации, соблюдение требований аддитивности, трудность обоснования адекватности математической абстракции для описания поведения фактических

величин. В пределе, при возрастании точности, нечеткая логика приходит к стандартной, булевой. По сравнению с вероятностным, нечеткий метод позволяет резко сократить объем производимых вычислений, что, в свою очередь, приводит к увеличению быстродействия нечетких систем.

Недостатками нечетких систем являются отсутствие стандартной методики их конструирования, невозможность их математического анализа существующими методами, применение нечеткого подхода по сравнению с вероятностным не приводит к повышению точности вычислений [183].

Все системы с нечеткой логикой функционируют по одному принципу: показания измерительных приборов фаззифицируются (переводятся в нечеткий формат), обрабатываются, дефаззифицируются и в виде привычных сигналов подаются на исполнительные устройства. При этом значения функции принадлежности $M(x)$ могут быть взяты только из априорных знаний, интуиции (опыта), опроса экспертов.

1.4.2 Математическое моделирование в условиях нечеткой логики

Как указывалось ранее, на сегодняшний день актуальна задача моделирования процессов старения и восстановления изоляции электрических двигателей для создания моделей прогнозирования с целью повышения эффективности использования основных фондов в сельскохозяйственном производстве. Однако во многих случаях для физических систем не удается найти адекватную математическую модель с последующим применением ее на практике. В связи с этим возникает необходимость в определении относительной степени упорядоченности открытых систем непосредственно по экспериментальным данным. Одним из методов, позволяющих это сделать, является информационно-логический анализ экспериментальных данных (ИЛА), в основу которого положены представления об измеримости информации, передаваемой изучаемому явлению от избранных параметров в условиях ее неоднородности [184].

Как известно, все методы решения прикладных задач можно разделить на две группы: точные, в которых ответ удается получить в виде математических формул, и численные, для которых решение сложных математических задач сводится к последовательному выполнению большого числа арифметических действий. В свою очередь, вычислительный или математический эксперимент основан на построении математической модели для описания изучаемых процессов и использовании новейших ЭВМ.

Суть вычислительного эксперимента заключается в следующем: на основе различных вариантов математических моделей с помощью ЭВМ проводятся исследования свойств объекта, процесса или системы, находятся их оптимальные параметры и режимы работы, уточняется математическая модель [183].

1.4.2.1 Моделирование нелинейных систем с одной степенью подвижности

Необходимость отыскания корней нелинейных уравнений встречается при расчетах систем управления и регулирования, собственных колебаний машин и механизмов, задачах кинематического анализа и синтеза плоских и пространственных механизмов и т. д. При этом задачу отыскания корней можно считать практически решенной, если мы сумеем определить корни с заданной точностью.

Процесс определения корней нелинейных уравнений состоит из двух этапов:

- отделение корней (определение интервалов [a; b], внутри которых лежит каждый корень уравнения);
- уточнение корней.

Процесс отделения корней проводят, как правило, исходя из физического смысла прикладной задачи: графически, с помощью таблиц, при помощи специальной программы. Считают, что интервал [a; b] при решении прикладных задач задан. Для алгебраических и трансцендентных уравнений пригодны одни и те же методы уточнения корней: метод половинного деления, метод итераций, метод Ньютона (касательных), метод хорд, метод секущих и др.

1.4.2.2 Моделирование линейных систем со многими степенями подвижности

Если прикладная система имеет несколько степеней подвижности, а физические процессы, протекающие в ней, линейны, то математическая модель такой системы описывается с помощью системы линейных уравнений (СЛУ), например, математические задачи планирования и управления. При этом при решении прикладных задач нелинейные процессы часто приходится линеаризировать.

Численные методы решения СЛУ можно разбить на две группы:

- точные (прямые), позволяющие получить решение за конечное число арифметических действий (например, правило Крамера, метод Гаусса (исключений), метод прогонки);
- приближенные (итерационные) по нахождению корней с заданной степенью точности, реализующиеся на ЭВМ [185], например, метод Гаусса.

В основе данного метода лежит идея последовательного исключения неизвестных. На первом этапе (прямой ход) система при помощи последовательного исключения неизвестных приводится к треугольному виду, на втором (обратный ход) – из системы треугольного вида последовательно в обратном порядке находятся корни. Метод Гаусса обладает недостатком: если

ведущий элемент какой-либо строки (a_{ij}) окажется равным 0, то этот метод формально непригоден, хотя система может иметь решение.

1.4.2.3 Моделирование нелинейных систем со многими входными переменными

В задачах проектирования или исследования поведения реальных объектов, процессов или систем математические модели должны отражать реальные физические процессы, протекающие в них. При этом параметры реальных объектов, процессов или систем связаны между собой нелинейными физическими законами. В связи с этим, математические модели реальных объектов, процессов или систем со многими входными переменными описываются системой нелинейных уравнений (СНУ).

В отличие от систем линейных уравнений для СНУ неизвестны прямые методы решения и всегда применяются итерационные методы. Метод Ньютона – наиболее распространенный метод для решения систем нелинейных уравнений. Он обеспечивает более быструю сходимость, чем другие методы. В основе метода Ньютона лежит представление всех n уравнений исходной системы в виде рядов Тейлора. В методе Ньютона на каждом шаге поиска необходимо формировать матрицу Якоби, при этом частные производные вычисляются аналитически, либо все частные производные можно заменить конечно-разностными значениями [186].

1.4.2.4 Моделирование динамических систем

Математические модели динамических систем, в которых выходные параметры изменяются в зависимости от времени или других факторов, описываются с помощью дифференциальных уравнений. На практике динамические системы встречаются часто, т. к. большая часть законов механики, электротехники, гидродинамики и др. описывается с помощью дифференциальных уравнений. Однако лишь небольшое число последних допускает интегрирование в квадратурах (сведение решения к численному интегрированию). Еще реже удается получить решение в элементарных функциях, в связи с чем большое распространение получили численные методы решения дифференциальных уравнений [186].

Общим решением дифференциального уравнения $y' = f(x, y)$, в котором неизвестная функция y зависит от одного или нескольких аргументов x, является семейство функций $y = y(x, C)$. При этом при решении прикладных задач обычно ищут частное решение, выделение которого из семейства общих осуществляется с помощью начальных условий. Нахождение частного решения дифференциального уравнения, удовлетворяющего условию $y(x_0) = y_0$, называется задачей Коши [187].

Наиболее эффективными и часто применяемыми методами решения задачи Коши являются методы Рунге – Кутта, основанные на аппроксимации искомой функции y в пределах каждого шага h многочленом, который получен

при помощи разложения функции y в ряд Тейлора. Усекая ряд Тейлора в различных точках, Рунге и Кутт обобщили и развили методы решения дифференциальных уравнений.

Методы Рунге – Кутта можно использовать не только для решения дифференциальных уравнений первого порядка, но и для решения уравнений более высоких порядков. Любое дифференциальное уравнение m-го порядка можно свести к системе, состоящей из m дифференциальных уравнений первого порядка [185].

1.4.3 Использование информационно-логического анализа при изучении влияния различных факторов на срок службы двигателя

Как известно, теория информации имеет дело с разнообразием элементов некоторой совокупности, свойственным каждому явлению, в т. ч. и процессу дефектообразования в обмотке электродвигателя. При этом данное разнообразие рассматривается как положительное явление, без которого такие операции, как отбор, связь, спецификация, были бы невозможны.

Если обозначить некоторую функцию через A, то каждое значение функции можно выразить через a_i, т. е. ранжировать. Не зная закономерности изменения A примем, что появление a_i есть случайное событие. Тогда частоты появления каждого ранга $A = a_i$ есть оценка условной вероятности $p(a_i)$. При этом величину неопределенности суждения $H(A)$ о появлении того или иного значения функции A можно оценить количественно

$$H(A) = -\sum p(a_i)\log_2 p(a_i), \tag{1.7}$$

т. е. неопределенность появления разных значений функции A равна сумме произведений вероятности появления каждого ранга $p(a_i)$ на двоичный логарифм этой же вероятности. Максимального значения неопределенность функции достигает при равновероятности всех ее состояний. Кроме того, при изучении зависимости явления A от фактора B, необходимо учитывать неопределенность фактора B, которая находится аналогичным образом по условной вероятности появления каждого ранга $p(b_j)$. При этом число рангов B может быть произвольным и отличаться от числа рангов появления A. В данном случае для каждого b_j можно рассчитать неопределенность

$$H(A/b_j) = -\sum p(a_i/b_j)\log_2 p(a_i/b_j). \tag{1.8}$$

В случае, если между A и B существует зависимость, то $H(A) \neq H(A/b_j)$. Разность данных величин служит мерой $J(A/b_j)$ того, насколько суждение об A при b_j становится более определенным, чем при знании только распределе-

ния A. В свою очередь, количество информации $T(A, B)$, поступающей от фактора B к явлению A, оценивается следующим образом

$$T(A,B) = \sum p(b_i) J(A/b_j). \tag{1.9}$$

Как видно, значение $T(A, B)$ зависит не только от связи между A и B, но и от величин их неопределенностей: чем больше неопределенность факторов, тем большее количество информации передается к явлению. Для устранения данного влияния введем коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A

$$K(A,B) = \frac{T(A,B)}{H(B)}. \tag{1.10}$$

Тогда при помощи таблиц 1.3 и 1.4 необходимо определить следующее:

- энтропию $H(B)$;
- энтропию $H(A)$;
- количество информации T;
- коэффициент эффективности передачи информации K.

Таким образом, определяются все факторы, влияющие на некоторую функцию A, т. е. для каждого фактора создается канал связи и находится коэффициент эффективности передачи информации: чем K больше, тем более сильное влияние оказывает данный фактор. Однако, поскольку сами факторы могут быть связаны между собой, необходимо выявить размеры информации, поступающей по совместным каналам связи. Для этого строят каналы связи к изученному явлению от двух и большего числа факторов. Так, например, сопоставление величин $T(A, T)$, $T(A, F)$ и $T(A; T, F)$, т. е. частных и общих зависимостей, позволяет определить косвенную информацию, возникающую вследствие их взаимной зависимости.

При вычленении прямого влияния фактора на изучаемое явление могут возникнуть три случая:

- $T(A, B) + T(A, C) = T(A; B, C)$ – информация, передаваемая от фактора с наименьшим значением T, косвенная и является результатом его зависимости от второго;
- $T(A, B) + T(A, C) > T(A; B, C)$ – каждый из факторов имеет относительно явления прямую информацию, однако некоторая часть ее носит косвенный характер и является продуктом их взаимной связи;
- $T(A, B) + T(A, C) < T(A; B, C)$ – каждый из факторов содержит прямую информацию, а косвенная информация или полностью отсутствует или незначительна.

Таблица 1.3 – Форма по отысканию зависимости функции A от фактора B

Фактор B	Функция A						Вероятность $p(b_j)$	Информативность $J(A/b_j)$
	$<a_1$	От a_1 до a_2	От a_2 до a_3	От a_3 до a_4	От a_4 до a_5	$>a_5$		
$<b_1$								
От b_1 до b_2								
От b_2 до b_3								
$>b_3$								

Таблица 1.4 – Форма по отысканию зависимости функции A от факторов T (температура окружающей среды) и F (влажность окружающей среды)

Температура окружающей среды T	Относительная влажность окружающей среды F	Функция A						$p(t_j)$	$J(A/t_j)$	$P(t,f)\times$ $\times I(A/t,f)$
		$<a_1$	От a_1 до a_2	От a_2 до a_3	От a_3 до a_4	От a_4 до a_5	$>a_5$			
$<t_1$	$<f_1$									
	От f_1 до f_2									
	От f_2 до f_3									
	$>f_3$									
От t_1 до t_2	$<f_1$									
	От f_1 до f_2									
	От f_2 до f_3									
	$>f_3$									
От t_2 до t_3	$<f_1$									
	От f_1 до f_2									
	От f_2 до f_3									
	$>f_3$									
$>t_3$	$<f_1$									
	От f_1 до f_2									
	От f_2 до f_3									
	$>f_3$									

В итоге, информационный анализ позволяет [184]:

- построить оптимальную «классификацию» явлений и факторов для проводимых исследований (величина шага ранга, количество рангов и т. д.);
- выявить область значений фактора, где явление устойчиво (инвариантно);
- определить меру зависимости явления от каждого состояния фактора, от фактора в целом и от совокупности состояний факторов;
- исключить факторы, связанные с явлением косвенно, в основном, в результате взаимной связи с некоторым третьим явлением.

На основании выявленных связей создается возможность для научной постановки опытов по изучению данного явления. Однако, информационный анализ является лишь первым шагом в обработке статистического материала. Для установления формы логической зависимости явления от рассматриваемого набора факторов необходимо воспользоваться функциями многозначной логики.

Для выявления зависимости между рядом факторов и явлением с использованием функций m-значной логики необходимо при помощи элементарных логических функций (конъюнкции, дизъюнкции и др.) построить различные гипотезы. В сложных логических функциях от нескольких аргументов отношения между аргументами могут иметь различный характер. При этом, большое значение имеет не только логический характер связи между аргументами, но и их положение друг относительно друга, определяемое по значению коэффициента эффективности передачи информации K: на первом месте по степени влияния на явление стоит фактор с наибольшим K, на втором, отделяясь от первого скобкой, фактор с меньшим значением коэффициента и т. д. Два фактора с близкими K скобкой не отделяются, например, $A = B(CD)$. Затем, по направлению информативности к максимальным или минимальным ранговым значениям можно предположить вид связи между факторами, например, $A = B \wedge (C \vee D)$, где $\wedge$ – логическая функция конъюнкции (логическое умножение), $\vee$ – логическая функция дизъюнкции (логическое сложение).

Заключительным этапом будет сопоставление теоретических и наблюдаемых распределений частот различных значений, позволяющее выбрать наиболее подходящую гипотезу.

Результатом выполненного автором исследования является математическая модель, где входными факторами служат параметры режимов и условий применения, обслуживания и хранения двигателя на протяжении всего его жизненного цикла, а выходным параметром – значение уровня его дефектности. Другими словами, автором впервые выведены логические зависимости (гипотезы), позволяющие оценить текущее состояние электрического двигателя в зависимости от соотношения и величины как положительно, так и отри-

цательно воздействующих факторов с использованием спектра напряженности внешнего магнитного поля ЭД.

Рассмотренная задача описания поведения явления непосредственно связана с вопросами прогноза состояния явления по заданному набору состояний факторов. Задачи экстраполяции выводов, полученных на основе анализа в пределах ограниченной территории, по сути идентичны прогнозу состояния явления при известном наборе факторов. Эту чисто географическую задачу можно рассматривать как частный случай задачи распознавания образов (состояний явления) по их признакам. Однако одним из существенных недостатков данного метода прогноза состояний явления является чрезвычайно большой объем расчетов, требующий применения в сложных случаях вычислительной техники. В то же время, при решении географических задач, для которых можно предполагать высокую детерминированность (предсказуемость) состояний явления сочетанием состояний факторов, оправдано применение принципов исчисления высказываний математической логики. При этом для построения единого аппарата анализа необходимо найти способ выражения принципов исчисления высказываний в мерах и терминах теории информации.

В основу раздела математической логики, посвященного исчислению высказываний, положен постулат формальной логики, утверждающий, что каждое высказывание не может быть одновременно истинным и ложным. В данном случае рассматриваются лишь два альтернативных состояния явления (функции A) и факторов (аргументов X и Y): действительное (истинное) состояние – 1 и ложное – 0.

Изучение элементарных логических функций позволило выделить три типа логики зависимости функции от аргументов:

1) значения функции зависят только от значений одного аргумента;
2) значения функции зависят от значений двух и большего числа аргументов, однако хотя бы одно из значений функции может быть определено по одному из значений только одного аргумента (при дизъюнкции, если хотя бы один из аргументов истинен, функция – действительна, при конъюнкции, если хотя бы один из аргументов ложен, функция – недействительна);
3) значения функции определяются только значениями двух аргументов.

Данные типы зависимости функции от аргументов полностью описывают все возможные случаи зависимости явления от факторов. Их сочетания образуют сложные высказывания, знание которых обеспечивает распознавание каждого состояния функции по заданным аргументам. Сложное высказывание, описывающее изменения состояний функции, называется булевой функцией и обозначается буквой E, строя которую можно сформулировать алгоритм (закон) распознавания состояний явления.

Вместе с тем, в реальных системах обычно приходится иметь дело с явлениями и факторами с числом состояний больше двух, т. е. реальные системы правильней рассматривать в терминах многозначной логики.

Логическая функция конъюнкции в многозначной логике Поста представляется следующим образом

$$X \wedge Y = df^{\min(x,\,y)}\,, \tag{1.11}$$

т. е. значение функции соответствует минимальному из значений аргументов.

В свою очередь, логическая функция отрицания в многозначной логике Поста задается следующей функцией

$$\overline{X} =_{df} (m + 1 - x), \tag{1.12}$$

где m – значность логики, x – значения состояния.

Логическая функция равнозначности может быть задана в виде

$$\mathrm{X} \sim \mathrm{Y} = \begin{cases} x, y = \overline{x}\,\overline{y} = a_m; \\ x = y = a_{\min}(a_{\max}); \\ \left.\begin{matrix} x = \overline{y} \\ y = \overline{x} \end{matrix}\right\} = a_{\max}(a_{\min}), \end{cases} \tag{1.13}$$

где a_m – любое из m значений функции.

Рассмотрение канала связи четырехзначной конъюнктивной функции показывает, что применение правила распознавания обеспечивает определение всех состояний функции при известных состояниях аргументов.

В реальных системах в полном виде логическая форма равнозначности встречается редко. Довольно большое число географических задач лишь в одном случае достоверно выявило эту логическую форму. К этому же типу логических функций можно отнести и все нелинейные функции вида $f = X \cdot Y \cdot \ldots K$, где значения функции и аргументов изменяются в интервале от нуля до бесконечности. При взаимодействии аргументов по логической функции равнозначности знание любого из их состояний ничего не дает для знания состояния функции, т. е. при любом значении любого аргумента может наблюдаться любое значение функции. Лишь нулевое значение любого аргумента несет информацию о состоянии функции (если $X = 0$, то значение функции также равно 0). Во всех других случаях для распознавания значения функции необходимо знать состояние обоих аргументов. Однако при распознавании не всех частных значений функций, а лишь некоторых ее обобщенных рангов, принимаемых на определенном этапе анализа дискретными, при условии конечности значений функции и аргументов в частных каналах свя-

зи удается выявить информацию и, соответственно, распознать состояние функции.

Интерпретация в терминах теории информации всех возможных логических форм взаимодействия аргументов, порождающих множество состояний функции, позволила сформулировать общее правило распознавания на основе частных каналов связи состояний функции при заданном сочетании состояний аргументов: действительно то состояние функции, к которому направлено наибольшее число связей; если одинаковое число связей направлено к различным состояниям, действительно то из них, по отношению к которому по направлениям связи передается наибольшая информация; если решение двойственно и распознаваемые состояния соседние, действительно то из них, для которого сумма коэффициентов связи наибольшая; если при двойственном решении прогнозируемые состояния удалены друг от друга на один ранг, истинное состояние лежит между ними.

Рассмотрим результаты распознавания состояний функции в сложном высказывании многозначной логики при стохастической независимости аргументов. Пусть задана логическая функция $A = C\boxed{\times}(X \vee Y)$ при $m = 4$, $X = 4$, $Y = 1$, $C = 2$. Соединение X и Y в дизъюнктивной форме дает новый аргумент A^+, который соединен с C логическим произведением. Для того, чтобы определить состояние функции, необходимо, прежде всего, решить выражение, заключенное в скобки, а затем все высказывание в целом: $A^+ =_{df} \max (X \vee Y) = 4$; $A = C\boxed{\times}A^+ = a_i$; $i = \log_2 1{,}6 \cdot 2 \cdot 4 = 3$, следовательно, $A = a_3$ или $A = 3$. Аналогично рассчитываются значения функции при любом возможном сочетании аргументов [188].

Применение информационно-логического анализа для выявления степени влияния факторов на наработку до очередной диагностики электрического двигателя позволило сформировать математическую модель [189], а также создать программный продукт, основными функциями которого являются количественное определение степени влияния воздействующих на ЭД факторов в процессе эксплуатации и ремонта, а также прогнозирование дополнительной наработки до очередного контроля состояния двигателя [190]. Большую сложность при этом вызывает ограниченное количество априорных данных, поэтому в системе реализована возможность самообучения, позволяющая накапливать «опыт», автоматически анализировать данные, и, как следствие, изменять рабочую гипотезу [191].

Результаты расчета степени влияния отрицательно воздействующих факторов на техническое состояние конструктивных элементов электрических двигателей, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях сельского хозяйства, при использовании информационно-логического анализа согласно вышеприве-

денным формулам сведены в таблицы А.1 – А.5 и изображены на рисунках А.1 – А.5 (Приложение А).

Таким образом, путем анализа значений полученных коэффициентов эффективности передачи информации $K(A, B)$, количественная оценка степени влияния воздействующих факторов на состояние электродвигателей, эксплуатирующихся на предприятиях сельского хозяйства, позволила установить, что фактором с сильнейшим отрицательным влиянием является влажность, составляющая 80 % от прочих факторов, таких как число пусков, агрессивная среда, температура воздуха, а наименьшее влияние оказывает наличие примесей в окружающей среде.

Следующим шагом в направлении практического использования полученных результатов является разработка экспертной системы оценки состояния и остаточного ресурса ЭД на основе анализа характера спектра напряженности его внешнего магнитного поля. Полученный алгоритм экспертной системы, описывающий переход от нормального состояния работы двигателя к аварийному и основанный на использовании информационно-логического анализа, позволяет оценить степень развития дефекта электродвигателя и определить его остаточный ресурс, т. е. принять решение о сроках и объеме мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту ЭД. Основываясь на данном алгоритме, для повышения эффективности сельскохозяйственных предприятий может быть разработано программное обеспечение для ЭВМ по прогнозированию и управлению дефектообразованием в электрических двигателях в реальных условиях эксплуатации, что выведенные логические зависимости (гипотезы) и рассчитанные коэффициенты позволяют осуществить в полной мере.

1.5 Основные результаты и выводы по разделу

1 Анализ причин возникновения частых отказов электрических двигателей в АПК выявил проблему низкой надежности ЭД, связанную с отсутствием теоретического обоснования комплексной оценки состояния электродвигателей, а также научно подтвержденных подходов к ускорению процессов разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции в ходе обслуживания и ремонта. При этом характерные для сельского хозяйства условия эксплуатации приводят, преимущественно, к появлению витковых замыканий вследствие износа обмотки статора двигателей.

2 На сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края за период с 1988 по 2009 гг. процент выхода из строя электродвигателей увеличился, в среднем, в 2 раза, а затраты на их ремонт – в 3 раза, что доказывает низкую эффективность использования системы планово-предупредительного ремонта

электрооборудования в сельском хозяйстве, в которой отсутствует учет технического состояния ЭД, а также таких взаимосвязанных факторов, как производительность ремонтной базы, длительности простоев оборудования и связанных с этим убытков.

3 Получившие на сегодняшний день распространение в агропромышленном комплексе методы восстановления работоспособности электродвигателей, в частности, разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток, а также нанесения изоляционных покрытий, определяющие состояние изоляции ЭД после ее технического обслуживания и ремонта, не в полной мере реализуют основные положения теории тепломассопереноса и, как следствие, не отвечают современным требованиям к качеству ремонта ЭД, экономии проводниковых и изоляционных материалов, экологии, условиям труда ремонтного и обслуживающего персонала. Кроме того, высокая стоимость сервисных услуг при резком уменьшении объемов и номенклатуры производства ремонтно-технического оборудования и средств диагностирования делают проблематичным обеспечение надежной работы ЭД в течение «второго», а иногда большего срока службы.

4 Известные принципы гидролитической деструкции связующего, а также электротермовакуумного восстановления изоляции электрических двигателей, которые обеспечивают сохранение номинальных параметров электродвигателей, уменьшение числа ЭД, списываемых как не соответствующих технологическим условиям, сохранение обмоточной меди по ее качественным и количественным характеристикам, высокую культуру производства, охрану труда, отсутствие вредного воздействия на окружающую среду, могут быть использованы при разработке единого технологического цикла ремонта электрических двигателей в сельском хозяйстве, заключающегося в подаче тепла и пропитывающего состава в сосуд, где изделие находится постоянно без каких-либо перемещений.

5 Предложенная структура системы повышения надежности электродвигателей при ее наполнении реальным практическим содержанием может обеспечить достижение поставленных целей исследования путем комплексного решения задач диагностики, прогнозирования, планирования и восстановления изоляции на протяжении всего срока службы ЭД, а разработанная блок-схема алгоритма принятия решения о проведении обслуживания и ремонта двигателей, включающая в себя новые, отличные от принятых в действующей системе планово-предупредительных ремонтов, элементы, – дополнить и расширить возможности системы ППР.

6 Количественная оценка степени влияния отрицательно воздействующих факторов на техническое состояние конструктивных элементов электрических двигателей, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях сельского хозяйства, при использовании информационно-логического анализа позволила установить, что фактором с сильнейшим отрицательным влиянием является влажность, составляющая 80 % от прочих факторов, таких как число пусков, агрессивная среда, температура воздуха, а наименьшее влияние оказывает наличие примесей в окружающей среде. Данная количественная оценка является основой для прогноза срока службы электрического двигателя и, как следствие, принятия решений, направленных на повышение эффективности проектирования, эксплуатации и ремонта названного вида ЭО.

7 Из-за множества сочетаний факторов, влияющих на наработку до очередной диагностики электродвигателя, для получения достоверного прогноза состояния ЭД, позволяющего оптимизировать сроки и продолжительность выполнения мероприятий по ТОиР, целесообразно использовать информационно-логический анализ, который дает возможность оценить неучтенные ранее факторы, что делает прогноз более полным и достоверным. Применение информационно-логического анализа позволяет создать на его основе самообучающуюся систему прогнозирования, направленную на пополнение базы априорных значений и повышение точности результатов.

2 МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

2.1 Современные методы диагностики электрических двигателей, используемых в сельском хозяйстве

Как известно, для уменьшения интенсивности отказов электродвигателей необходимо при проведении технического обслуживания и ремонта, наряду с мероприятиями, предусмотренными инструкцией по эксплуатации ЭД, устанавливать фактическое техническое состояние их элементов, т. е. определять, не превышают ли параметры элементов двигателей своих допустимых значений, и выявлять наличие в элементах скрытых дефектов [192]. Другими словами, прежде чем говорить о повышении качества пропиточно-сушильных работ, необходимо решить вопрос о достоверности диагностики ЭД как в процессе его эксплуатации, так и в ходе ремонта.

После проведения комплексной диагностики появляется возможность определения интенсивностей выходов из строя электродвигателей уже не на основе статистики отказов, которая может оказаться неточной, отсутствующей или сильно отличающейся от будущей статистики расчетного периода, а на основе объективного прогноза их остаточного ресурса. Построенные планы ремонтных мероприятий при данном подходе имеют большую точность и адекватность.

Кроме того, разрабатываемая диагностическая система должна на основании полученных данных определить наличие неисправностей (или возможной неисправности) и в простейшем случае оповестить оператора, который принимает решение о дальнейших действиях. Диагностическая система более высокого уровня может предлагать оператору варианты корректирующих действий, а высшего уровня – осуществляет диагностику и автоматически выполняет корректирующие функции.

В отечественной науке значительное влияние на современное развитие методов контроля и диагностики ЭД оказали А. А. Пястолов, И. Е. Иерусалимов, О. Д. Гольдберг, Э. К. Стрельбицкий, О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков, Ю. П. Ильин, А. Е. Немировский, О. И. Хомутов, С. А. Волохов, И. А. Биргер, В. И. Сташко и др. [30, 35, 39, 41, 49, 76, 87, 90, 93, 96, 168].

Известно три основных метода диагностики в непрерывном процессе [44]:

- статистический метод, основанный на связи неисправности и ее симптомов;
- детерминистический метод, построенный на анализе элементов объекта диагностики и выявлении тех его точек, в которых необходимо проверять наличие симптомов неисправностей;
- распознавание последовательностей симптомов – метод, основанный на сравнении реальной последовательности симптомов с эталонами, которые хранятся в запоминающем устройстве.

Показатели действительного состояния объекта и его работоспособности в некоторый момент времени дают возможность получать информацию о функционировании объекта в прошлом и позволяют говорить о поведении объекта в предстоящий период эксплуатации. Эффективность диагностики и предотвращение отказов существенно возрастают, когда при сохраняющемся

содержании контрольно-измерительных операций появляется возможность осуществить прогноз изменения состояния объекта [35, 168, 192]. При этом информативность диагностических параметров, как и параметров назначения и надежности объектов, которые связаны с измеряемыми физическими величинами функциональными зависимостями, зависит от состояния конкретных элементов диагностируемого объекта [193, 194].

В работе [195] отмечена возможность замены проведения прямых измерений косвенными, результат которых получают после прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Подавляющее большинство разрабатываемых в настоящее время методов диагностики и прогнозирования технического состояния электродвигателей основаны на косвенных измерениях [196].

С точки зрения повышения достоверности результатов оценки технического состояния двигателей, большой интерес представляет использование методов диагностики ЭД при работе под нагрузкой. Это направление в настоящее время активно развивается такими учеными, как Г. Л. Артемян, А. А. Стеценко, Н. В. Коныгин, В. А. Русов и их коллегами [89, 97, 116, 197]. Можно выделить ряд направлений, в которых удалось достичь определенных успехов: контроль состояния обмоток статора с помощью анализа посланных на обмотку импульсов различных видов; вибрационный контроль [198]; контроль параметров электромагнитного поля.

Все существующие на сегодняшний день электрические методы диагностики изоляции можно разделить на две большие группы: разрушающие и неразрушающие. К группе разрушающих методов относятся испытания изоляции импульсным напряжением, повышенным напряжением промышленной частоты и выпрямленным напряжением. Разрушающие методы диагностики дают возможность получить наиболее полную информацию о состоянии изоляции, но их применение в реальных условиях эксплуатации электродвигателей сопряжено с определенными трудностями. Во-первых, они дорогостоящи по применяемой аппаратуре, а, во-вторых, двигатель, при неудовлетворительном состоянии изоляции, после испытаний теряет работоспособность и к дальнейшей эксплуатации не пригоден. Поэтому данные методы используются, в основном, на предприятиях, выпускающих электрические машины [169, 199].

Более приемлемы для применения в условиях сельскохозяйственного производства и широко используются в настоящее время неразрушающие методы диагностики [200]. При этом для диагностики изоляции двигателей больше всего подходят методы, основанные на воздействии электрического тока. Подавая на обмотку статора электродвигателя постоянное или переменное напряжение, посылая тестирующие импульсы и т. п., можно простыми и доступными средствами косвенно или непосредственно измерять значения диагностических параметров [201 – 203].

В настоящее время ведутся работы в двух перспективных направлениях в области технического мониторинга и диагностики. Это вибродиагностика и спектральный анализ магнитного поля в зазоре электрической машины [2, 193, 198, 204 – 206].

Указанные методы позволяют получить большое количество информации о контролируемом объекте, но все они имеют недостатки. Их наличие может привести к невозможности обнаружения дефекта, который повлечет за собой

аварию машины. Для компенсации недостатков различных методов оценки технического состояния ЭД необходимо использование системы комплексного мониторинга, математический аппарат которой совмещает несколько взаимодополняющих методов [60, 91, 92, 207 – 209]. Особого внимания в контексте рассматриваемого вопроса заслуживает такой метод диагностики, как метод волновых затухающих колебаний [6, 58, 90, 112, 210, 211].

Данный метод, основанный на использовании ВЗК, является одним из наиболее достоверных и точных методов, позволяющих определить реальное состояние изоляции ЭД, основным достоинством которого является то, что он дает возможность производить оценку состояния межвитковой изоляции. Однако основным препятствием для повсеместного внедрения данного метода диагностики является то, что для каждого типа ЭД, а также двигателей нестандартного исполнения, модернизированных при капитальном ремонте, отсутствуют эталонные значения диагностических параметров, которые для конкретного типа двигателя будут индивидуальными. В данном случае, под эталонным понимается состояние электроизоляционной системы (ЭИС) нового ЭД, выполненного с соблюдением требований ТУ и ГОСТов, и не имеющего дефектов. В настоящее время актуальной является задача нахождения диагностического параметра, шкала значений которого подходила бы для любого типа электродвигателей. Четкое разграничение значений диагностического параметра необходимо для осуществления прогнозирования процесса дальнейшего старения и наиболее вероятного срока службы ЭД [212, 213].

Таким образом, учитывая, что в последнее время требования к ТОиР таковы, что необходимо отслеживать качество выполнения операций по восстановлению обмотки [214, 215], одним из решений является разработка принципов комплексной диагностики на базе метода ВЗК и метода, основанного на анализе параметров внешнего магнитного поля двигателя, способной оценить состояние ЭД на всех этапах его жизненного цикла. Другими словами, в процессе эксплуатации решение задачи не допустить неисправность или восстановить нарушенное соответствие электродвигателей техническим требованиям невозможно без эпизодической или непрерывной диагностики, и в этом случае применяется метод на основе анализа ВМП [216]. При ремонте же необходимо отслеживать качество выполнения его этапов, что возможно при использовании метода ВЗК [217, 218]. Применение данной комплексной диагностики позволяет создать инструмент для получения неограниченного доступа к исследованию процессов, происходящих в изоляции на всем протяжении жизненного цикла ЭД.

Теоретические основы указанного выше метода диагностики электродвигателей в процессе их эксплуатации, основанного на анализе гармонического состава напряженности их внешнего магнитного поля, приводятся далее. Именно в нем объединены принципиальные плюсы всех других перспективных методов, а именно [109, 219]:

- для диагностирования нет необходимости выводить двигатель из эксплуатации;
- двигатель диагностируется под нагрузкой;
- в равной степени достоверности диагностируются все основные узлы ЭД;
- простота в эксплуатации и относительная дешевизна.

2.2 Теоретическое обоснование диагностики электродвигателей на основе зависимости гармонического состава напряженности их внешнего магнитного поля от степени развития дефектов

2.2.1 Исследование природы и источников внешнего магнитного поля электрических двигателей

Структура внешнего магнитного поля складывается из трех составляющих: переменного, остаточного и индуцированного полей [206, 220, 221] и представляет собой суммарное поле, создаваемое различными частями двигателя и экраном.

Основными источниками переменного ВМП двигателей являются обтекаемые током обмотки статора и ротора. В пределах магнитопровода обмотками создается рабочий магнитный поток, который, как известно из теории электрических машин, приближенно можно считать не зависящим от тока нагрузки [220]. Поэтому целесообразно принять, что первичное переменное ВМП, в основном, образуется за счет ответвления части магнитного потока от ярма статора, независящей от тока нагрузки, и за счет потока рассеяния лобовых частей обмоток статора и ротора, пропорционального току нагрузки. У короткозамкнутых электродвигателей поток рассеяния от лобовых частей обмотки ротора незначителен, хотя, как показывают исследования, он оказывает некоторое влияние на ВМП. Основным источником вторичного ВМП является обтекаемая вихревыми токами корпусная оболочка.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, переменное ВМП проявляет себя в достаточно широком диапазоне частот [222]. На частотах, кратных основной (преимущественно первые нечетные гармоники), переменное ВМП создается вследствие нелинейности характеристик ферромагнитных материалов и наличия высших гармоник в питающем напряжении. На зубцовых гармониках появление ВМП обусловлено, прежде всего, пульсациями рабочего магнитного потока [220, 223]. На частоте скольжения ($f_2 = f / s$) переменное ВМП может быть обусловлено несимметричным растеканием токов по ротору и некоторыми другими причинами. В спектре напряженности ВМП электродвигателя возможно присутствие и других временных гармоник, обусловленных, например, статическим и динамическим эксцентриситетом ротора [93, 224], влиянием анизотропии свойств стали ротора [225].

В свою очередь, остаточное ВМП создается неподвижными ферромагнитными деталями и узлами с остаточной намагниченностью. Оно может существовать и при включенном, и в выключенном состоянии ЭД. Из-за остаточной намагниченности вращающихся частей может возникнуть и переменная составляющая ВМП соответствующей частоты. Индуцированное ВМП – это неизменная во времени часть ВМП, возникающая от того, что намагничиваясь в магнитном поле Земли, ферромагнитные части ЭД вызывают его локальное изменение [206, 221]. Наиболее надежным способом снижения этого

поля, а также остаточного, является максимально возможное использование в конструкции двигателя немагнитных материалов [226].

При разработке математической модели переменного внешнего магнитного поля на частоте питающей сети, имеющего наиболее высокую интенсивность в сравнении с полями других частот, в расчетной модели ЭД учитывались основные первичные источники: сердечник, лобовые части обмоток, корпусная оболочка, наружный центральный и торцевые ферромагнитные пояса и др. При этом значения напряженности магнитного поля на различных участках поверхности сердечника считаются известными из результатов расчета магнитной цепи ЭД.

Самое большое влияние на ВМП ЭД оказывают обмотки и магнитопровод двигателя (активное ядро машины). Интенсивность внешнего магнитного поля данных частей ЭД как источника можно оценить по уровню их магнитного момента. Магнитный момент для оценки выбран потому, что он является параметром источника магнитного поля, характеризующим его ВМП на «далеких» (превышающих в несколько раз габаритные размеры источника) расстояниях [227]. Стандарт СЭВ 1052-89 «Метрология. Единицы физических величин» определяет два вида магнитных моментов:

– амперовский момент, являющийся характеристикой катушек с током,

$$\overline{M} = I\overline{S}, \tag{2.1}$$

где I – ток в контуре; $\overline{S}$ – вектор площади контура;

– кулоновский магнитный момент, являющийся характеристикой намагниченного ферромагнетика,

$$\overline{M} = \Phi\overline{l} / \mu_0, \tag{2.2}$$

где Φ – магнитный поток; $\overline{l}$ – длина магнитопровода в направлении плотности магнитного потока; μ_0 – магнитная постоянная.

Как известно из теории электрических машин, вращающееся магнитное поле можно разложить на 2 пульсирующих в перпендикулярных направлениях поля [228]. Активное ядро машины переменного тока обладает вращающимся ВМП, которое является результатом взаимодействия двух пульсирующих в главной плоскости полей:

$$\begin{aligned} M_{MX} &= 0; \\ M_{MY} &= M_M \cos(\omega t + \varphi_M); \\ M_{MZ} &= M_M \sin(\omega t + \varphi_M). \end{aligned} \tag{2.3}$$

Для простоты рассмотрим ВМП по одной оси, например, Z.

Текущее значение магнитной индукции в зазоре машины

$$B_\varphi = F_\varphi \cdot \lambda_\varphi, \tag{2.4}$$

где F_φ – текущее значение магнитодвижущей силы; λ_φ – текущее значение магнитной проводимости элемента воздушного зазора.

Считаем, что ротор расположен симметрично относительно статора, тогда

$$\lambda_\varphi = \lambda_0 = \frac{\mu_0}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta_0}, \tag{2.5}$$

где k_δ – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера); k_μ – коэффициент, учитывающий насыщение зубцовой зоны.

Основная гармоника намагничивающей силы в машине переменного тока

$$F_\varphi = F_0 \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \tag{2.6}$$

где ω – частота вращения магнитного поля статора.

Получаем выражение

$$B = B_m \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \tag{2.7}$$

где $B_m = F_m \lambda_0$ – максимальное значение основной гармоники магнитной индукции при симметричном приведенном зазоре.

Появление спектра гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем магнитном поле машины. Учитывая то обстоятельство, что индукция внешнего магнитного поля с удалением от источника спадает по закону $B \equiv \frac{1}{R^{n+2}}$, где n – порядок магнитного мультиполя [206, 227, 229], на уровне основного внешнего магнитного поля машины порядка p можно пренебречь гармониками порядка ($p + к$) в связи с их более быстрым спаданием. Так как ВМП машины экранируется корпусом, это должно быть учтено, например, с помощью коэффициента экранирования $k_э$. Тогда радиальную индукцию ВМП машины можно записать в виде $B_R = B_0 \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi)$, где $B_0 = k_э B_m$.

Таким образом, можно предположить, что индукция ВМП бездефектного двигателя изменяется во времени по синусоидальному закону. Ряд опытов, проведенный на новых ЭД различных конструкций, подтвердил сделанные предположения и позволил получить следующие картины изменения индукции поля (рисунок 2.1) [2, 162].

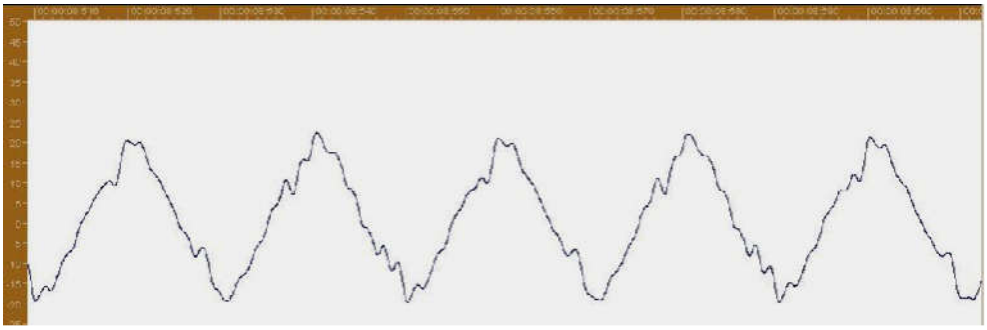


Рисунок 2.1 – Картина изменения индукции ВМП
бездефектного двигателя во времени

Но, как показывает практика, на ВМП также могут иметь значительное влияние другие факторы, помимо рассмотренных [230].

Так, по результатам многочисленных исследований, подводы электроэнергии и межкатушечные соединительные токопроводы электрических машин в ряде случаев оказывают существенное влияние на их характеристики [231]. В [221, 228] доказывается, что принятое в теории электрических машин допущение о пренебрежении магнитным полем токов в контурах соединений не всегда справедливо. Там же показана возможность замены сложного по форме контура обмотки машины замкнутыми контурами катушек и контурами соединений, а также обоснована справедливость независимого рассмотрения магнитного поля соединений и поля контуров катушек. Исходя из этих положений, рассмотрим ВМП соединений и его влияние на общее ВМП электрических машин. ВМП подводящего кабеля при этом из рассмотрения исключим, т. к. кабель является самостоятельным изделием. Развилка его в месте подключения к выводам обмотки машины отнесена к машине. Это сделано потому, что ее конфигурация и расположение, как правило, определяются конструктором электрической машины и, зачастую, она находится в коробке выводов.

В таком случае соединения представляют собой замкнутый контур, обтекаемый рабочим током электрической машины. Расположение его элементов в пространстве определяется положением коробки выводов и соединяемых катушек [227, 229].

Рассмотрим влияние токоподвода на ВМП машин переменного тока.

Активное ядро машины переменного тока обладает вращающимся внешним магнитным полем, которое является результатом взаимодействия двух пульсирующих в главной плоскости машины полей (2.3). ВМП соединений, будучи представленным суммой магнитных моментов участков, каждый из которых содержит свое значение M и фазу φ, в общем случае имеет составляющие по всем осям. Суперпозиция ВМП активного ядра машины и соединений образует суммарное ВМП:

$$
\begin{aligned}
M_X &= M_{xc}\sin(\omega t + \varphi_{xc});\\
M_Y &= M_M\cos(\omega t + \varphi_M) + M_{yc}\sin(\omega t + \varphi_{yc});\\
M_Z &= M_M\sin(\omega t + \varphi_M) + M_{zc}\sin(\omega t + \varphi_{zc}).
\end{aligned}
\tag{2.8}
$$

Из (2.8) видно, что в осевом направлении (OX) ВМП машины переменного тока определяется соединениями. В радиальном направлении оно в значительной степени зависит от фазовых соотношений магнитных моментов активного ядра машины и соединений. Для снижения ВМП электрических машин необходимо их выводы и соединения бифилировать путем плотной укладки проводов с обратным направлением тока, т. е. создания по оси вала машины контуров с противонаправленными магнитными моментами, сумма которых равна нулю.

Будем считать, что выводы обмоток сбифилированы и что внешнее магнитное поле токов в контурах не оказывает значительного влияния на общее ВМП ЭД.

Кроме того, в [225] доказано, что анизотропия свойств стали ротора влияет на ВМП ЭД, а именно создает спектр гармоник. В работе [93] Волохов С. А. показал наличие ряда таких гармоник, представленных в таблице 2.1 (f_s – частота скольжения).

Таблица 2.1 – Влияние анизотропии свойств стали ротора на внешнее магнитное поле электрических машин

Полюсность машины $2p$	Частота магнитных мультиполей, Гц
2	$50 - 2f_s$
4	f_s, $(50 - 2f_s)$
6	$(16{,}6 + 0{,}67f_s)$, $(16{,}6 - 1{,}3f_s)$

Данные, приведенные в таблице 2.1, показывают, что рассматриваемый дефект создает гармоники ниже основной и оказывает малое влияние на общий уровень ВМП.

Таким образом, внешнее магнитное поле ЭД обладает достаточной информативностью для определения дефектности двигателя, однако имеет очень сложную структуру, и для его моделирования необходимо сделать ряд допущений с целью упрощения расчетов и получения конечного результата моделирования [232].

2.2.2 Анализ проявления различных дефектов электродвигателя в спектре напряженности его внешнего магнитного поля

Магнитная индукция внешнего магнитного поля электрических машин в значительной мере определяется различного рода несимметриями обмоток и магнитной системы. Это, в первую очередь, относится к многополюсным машинам, собственное магнитное поле которых имеет мультипольный харак-

тер, определяемый числом пар полюсов [233]. Несимметрии нарушают этот мультипольный характер внешнего магнитного поля, вызывая спектр пространственных гармоник индукции, в том числе дипольную гармонику, спадающую с расстоянием от электрической машины наиболее медленно.

Одной из несимметрий, существенно влияющих на уровень внешнего магнитного поля электрических машин, является несимметрия основного воздушного зазора, вызванная, в частности, статическим эксцентриситетом ротора (рисунок 2.2). Эксцентриситет ротора является наиболее часто встречающимся видом несимметрии в электрической машине. Причины его появления – неточность установки ротора относительно расточки статора и выработка подшипников в процессе эксплуатации [93].

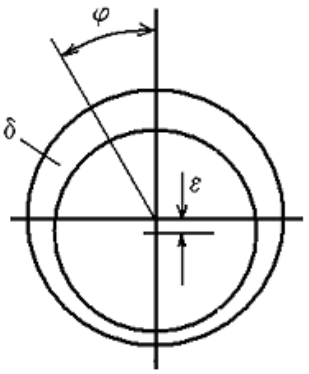


Рисунок 2.2 – Статический эксцентриситет ротора

Текущее значение воздушного зазора δ_φ при наличии статического эксцентриситета определяется выражением

$$\delta_\varphi = \delta_0 \cdot (1 + \varepsilon \cdot \cos\varphi), \tag{2.9}$$

где δ_0 – воздушный зазор при симметричном положении ротора; ε – относительный эксцентриситет.

Текущее значение магнитной проводимости элемента воздушного зазора электрической машины

$$\lambda_\varphi = \frac{\mu_0}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta_\varphi}. \tag{2.10}$$

С учетом (2.1) магнитная проводимость может быть представлена в виде ряда

$$\lambda_\phi = \lambda_0 \cdot \left(1 - \varepsilon \cos\varphi + \varepsilon^2 \cos^2\varphi - \varepsilon^3 \cos^3\varphi + \ldots\right), \tag{2.11}$$

где λ_0 – магнитная проводимость зазора при симметричном положении ротора, определяемая по (2.5).

Магнитная индукция в зазоре при подстановке (2.11) в (2.5)

$$B = B_m \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) \cdot \left(1 - \varepsilon\cos\varphi + \varepsilon^2 \cos^2\varphi - \varepsilon^3 \cos^3\varphi + \ldots\right). \tag{2.12}$$

Воспользовавшись выражением для $\cos^n\varphi$ и тем, что $\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta) = 2\cdot\cos\alpha\cdot\cos\beta$, после преобразований (2.12) получим следующее выражение для магнитной индукции в воздушном зазоре машины

$$
\begin{aligned}
B_\varphi = {} & B_m \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) \cdot \left(1 + 0.5\varepsilon^2 + \ldots\right) - \\
& - 0.5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-1) \cdot \varphi)\varepsilon \cdot \left(1 + 0.75\varepsilon^2 + \ldots\right) - \\
& - 0.5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+1) \cdot \varphi)\varepsilon \cdot \left(1 + 0.75\varepsilon^2 + \ldots\right) + \\
& + 0.25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-2) \cdot \varphi)\varepsilon^2 \cdot \left(1 + \varepsilon^2 + \ldots\right) + \\
& + 0.25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+2) \cdot \varphi)\varepsilon^2 \cdot \left(1 + \varepsilon^2 + \ldots\right) - \ldots
\end{aligned}
\tag{2.13}
$$

Анализ (2.13) показывает, что наличие статического эксцентриситета ротора приводит к появлению в зазоре электрической машины спектра гармоник магнитной индукции с порядком выше и ниже основной. Наиболее ярко выраженными являются гармоники порядка (p – 1) и (p + 1). Теоретические выводы подтверждаются экспериментальными данными (рисунок 2.3) [93, 234].

Чем больше отличие порядка гармоники от основной, тем меньше ее уровень, что связано с числовым коэффициентом при B_m и с возрастающей степенью относительного эксцентриситета, который всегда меньше единицы [93, 221, 228].

Как уже указывалось, на уровне основного ВМП машины порядка p можно пренебречь гармониками порядка (p + $к$) в связи с их более быстрым спаданием.

Можно также в (2.13) пренебречь составляющими в скобках с ε^2, ε^4, … Тогда радиальную индукцию внешнего магнитного поля машины можно записать в виде

$$
B_R = B_0 \cos(\omega t + p\varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^k \cdot \varepsilon^k \cdot B_k \cos[\omega t + (p-k) \cdot \varphi]. \tag{2.14}
$$

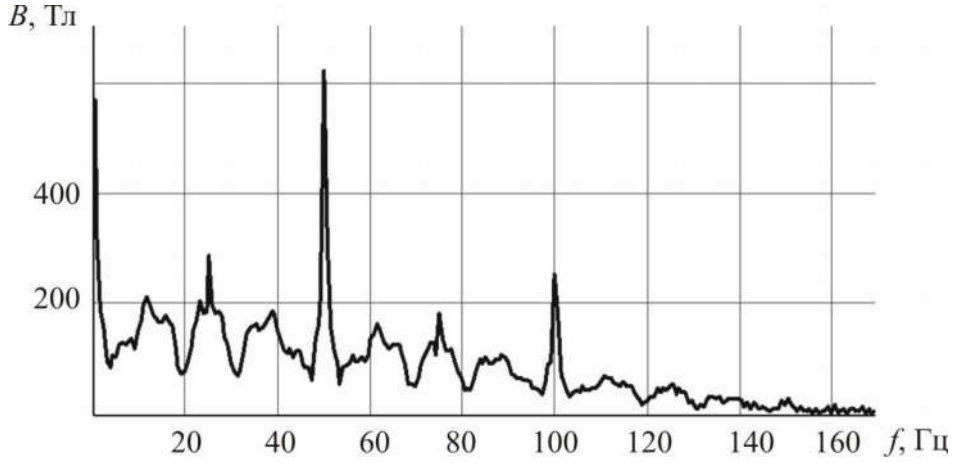


Рисунок 2.3 – Спектр гармоник индукции ВМП при статическом эксцентриситете

Для простоты расчетов рассмотрим сначала влияние статического эксцентриситета на ВМП машины переменного тока. Привяжем сферические координаты к электрической машине, как показано на рисунке 2.4, и представим радиальную индукцию ее внешнего магнитного поля в виде ряда Гаусса

$$B_R = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^{\infty} \left(M_{gnm} \cos m\varphi + M_{hnm} \sin m\varphi \right) \cdot P_n^m \cos \upsilon, \tag{2.15}$$

где R, φ, υ – сферические координаты точки определения индукции; M_{gnm}, M_{hnm} – коэффициенты, интерпретируемые, как магнитные моменты мультиполей;
$P_n^m \cos \upsilon$ – присоединенные полиномы Лежандра.

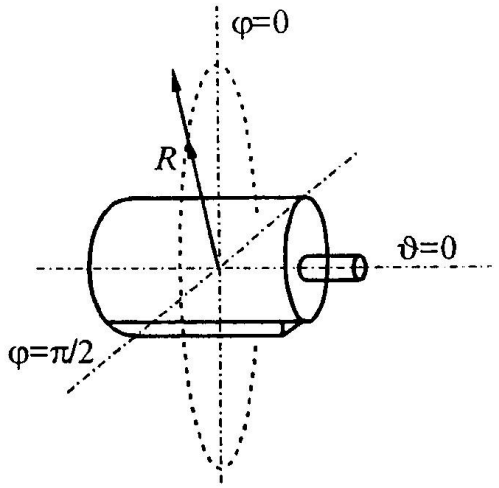


Рисунок 2.4 – Сферические координаты электрической машины

Для простоты рассмотрения будем считать, что эксцентриситет расположен по одной оси (φ = 0), как изображено на рисунке 2.4. Тогда во внешнем магнитном поле рассматриваемой машины имеются только коэффициенты ряда M_{gnm}, и в плоскости основного магнитного потока машины (плоскость $\upsilon = \pi / 2$) выражение для радиальной индукции примет вид

$$B_R = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^{\infty} \left(M_{nm} \cos m\varphi \cdot P_n^m (\cos \frac{\pi}{2}) \right) =$$
$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \left[M_{n0} P_n \cdot \left(\cos \frac{\pi}{2} \right) + M_{nn} P_n^n \cdot \left(\cos \frac{\pi}{2} \right) \right]. \tag{2.16}$$

Рассмотрим влияние статического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле машин различной полюсности, ограничивая ряд (2.14), как указано ранее, членами с порядком $n \le p$ и эксцентриситетом ε в степени $k \le 2$.

Для двухполюсной электрической машины (p = 1):
из (2.15) магнитная индукция внешнего магнитного поля машины

$$B_R = B_0 \cos\varphi - \varepsilon B_1 + \varepsilon^2 B_2 \cos\varphi; \tag{2.17}$$

из (2.16) при n = 1 и 2, m = 0 и 1 магнитная индукция внешнего магнитного поля

$$B_R = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} \cdot M_{11} \cos\varphi + \frac{\mu_0}{4\pi R^4} \cdot M_{20}\,. \tag{2.18}$$

Приравняв правые части (2.17) и (2.18), найдем значения магнитных моментов

$$\begin{aligned} M_{11} &= \frac{4\pi R^3}{\mu_0}\left(B_0 + \varepsilon^2 B_2\right); \\ M_{20} &= -\frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot \varepsilon B_1; \end{aligned} \tag{2.19}$$

Из анализа (2.19) следует, что статический эксцентриситет у двухполюсной машины несколько увеличивает собственный магнитный момент (добавка пропорциональна ε^2) и приводит к появлению квадруполя M_{20}, радиальная компонента магнитной индукции которого в плоскости $\theta = \pi/2$ не зависит от координаты φ. В целом влияние статического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле двухполюсной машины незначительно.

Для четырехполюсной машины (p = 2), выполняя аналогичные преобразования, находим значения магнитных моментов

$$\begin{aligned} M_{11} &= \frac{4\pi R^3}{\mu_0} \cdot \varepsilon B_1; \\ M_{20} &= \frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot \varepsilon^2 B_2; \\ M_{22} &= \frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot B_0. \end{aligned} \tag{2.20}$$

Анализ (2.20) показал, что статический эксцентриситет у четырехполюсной машины приводит к появлению магнитного диполя M_{11}, магнитный момент которого пропорционален ε, и осевого квадруполя M_{20}, магнитный момент которого пропорционален ε^2. Собственный магнитный момент машины M_{22} при этом практически не изменяется [221]. Так как внешнее магнитное поле магнитного диполя спадает наиболее медленно с удалением от машины, можно заключить, что статический эксцентриситет оказывает существенное влияние на уровень внешнего магнитного поля четырехполюсной электриче-

ской машины, определяя ее внешнее магнитное поле на «далеких» расстояниях (вместе с другими несимметриями, вызывающими появление у четырехполюсной машины дипольного магнитного момента).

Из анализа выражений для шестиполюсной машины следует, что статический эксцентриситет приводит к появлению диполя M_{11}, магнитный момент которого пропорционален ε^2, и магнитного квадруполя M_{22}, момент которого пропорционален ε. Собственный магнитный момент машины при этом практически не изменяется.

Таким образом, статический эксцентриситет вызывает у электрических машин наиболее существенный с точки зрения внешнего магнитного поля магнитный диполь, магнитный момент которого пропорционален $M_d \equiv \varepsilon^{p-1}$. Наиболее сильно это проявляется у четырехполюсных машин. Учитывая то обстоятельство, что значительное число электрических машин выполняются с числом полюсов $2p = 4$, наличие дипольной составляющей индукции в их ВМП (дипольного магнитного момента) может служить диагностическим признаком статического эксцентриситета [2].

Для выявления проявлений витковых и фазных замыканий во внешнем магнитном поле электродвигателя рассмотрим поле двухполюсной машины, создаваемое катушкой с полным шагом, уложенной на поверхности равномерного воздушного зазора (рисунок 2.5 *а*) [206, 228, 235]. Характер создаваемого при этом магнитного поля изображен на рисунке 2.5 *а* линиями магнитной индукции в воздушном зазоре, а распределение B_δ показано штриховой кривой на рисунке 2.5 *б*. Вогнутость этой кривой объясняется влиянием конечной магнитной проницаемости стали.

Если принять для стали $\mu = \infty$ и пренебречь искажением поля около проводников катушки, то распределение B_δ вдоль зазора будет представлено в виде прямоугольной волны, изображенной на рисунке 2.5 *б* сплошной линией.

Связь между полным током катушки $w_K\, i_K$, где w_K – число витков в катушке, i_K – ток в ней, и напряженностью поля H определяется законом полного тока

$$w_K\, i_K = \int H dl\,, \tag{2.21}$$

где интегрирование проводится по любому замкнутому контуру, охватывающему катушку, например, по контуру, показанному на рисунке 2.5 *а* жирной линией.

При $\mu = \infty$ напряженность магнитного потока в стали $H = 0$. Кроме того, поскольку величина зазора δ мала по сравнению с полюсным делением τ, то можно считать, что магнитные линии пересекают зазор радиально, напряженность поля вдоль воздушного зазора постоянна по величине и изменяется по направлению согласно рисунку 2.5.

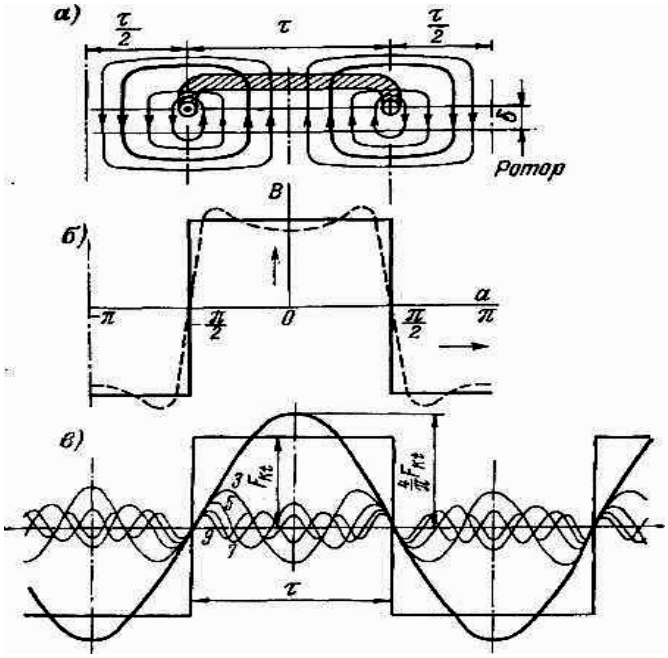


Рисунок 2.5 – Магнитное поле в зазоре, создаваемое катушкой с полным шагом

При этих условиях

$$H = \frac{1}{\partial}\frac{w_K i_K}{2}. \qquad (2.22)$$

Таким образом, мгновенное значение индукции поля в зазоре в данной точке определяем по формуле

$$B_{[t,a]} = м_0 H = \frac{м_0}{\partial}\frac{w_k i_k}{2} = л_\partial F_{kt}, \qquad (2.23)$$

где λ_δ – удельная проводимость воздушного зазора; F_{kt} – намагничивающая сила (н. с.), необходимая для проведения магнитного потока через воздушный зазор.

Н. с. катушки изменяется вдоль зазора в виде прямоугольной волны (рисунок 2.5 *в*) с высотой F_{kt}. При равномерном зазоре и при ненасыщенной стали кривая индукции вдоль зазора повторяет по форме кривую н. с., т. к. λ_δ = const.

Для удобства анализа происходящих в машине процессов кривую поля в зазоре и, соответственно, кривую н. с. разложим на гармонические составляющие.

Кривая н. с. катушки с полным шагом (рисунок 2.5 *в*) вследствие своей симметрии относительно оси абсцисс содержит только нечетные гармониче-

ские ($\nu = 1, 3, 5, ...$) и, когда ось ординат выбрана по оси катушки, может быть записана в виде

$$F_{[t,a]} = F_{kt1}\cos a + F_{kt3}\cos 3a + ... + F_{kt\nu}\cos \nu a + ... \qquad (2.24)$$

При протекании по катушке переменного тока уравнение (2.24) будет представлять собой сумму пульсирующих волн н. с., т. к. их амплитуды $F_{kt\nu}$ будут изменяться во времени по синусоидальному закону.

Рассмотрев группу из q катушек с полным шагом, уложенных на протяжении двойного полюсного деления и принадлежащих одной фазе (рисунок 2.6, q = 3), сдвинутых друг относительно друга на угол $\gamma = \frac{\pi}{mq}$, равный углу сдвига соседних пазов по основной волне, получим н. с. группы катушек с полным шагом

$$F_{q[t,a]} = F_{qt1}\cos a + F_{qt3}\cos 3a + ... + F_{qt\nu}\cos \nu a + ..., \qquad (2.25)$$

причем координату отсчитываем от оси группы (рисунок 2.7) [235, 236].

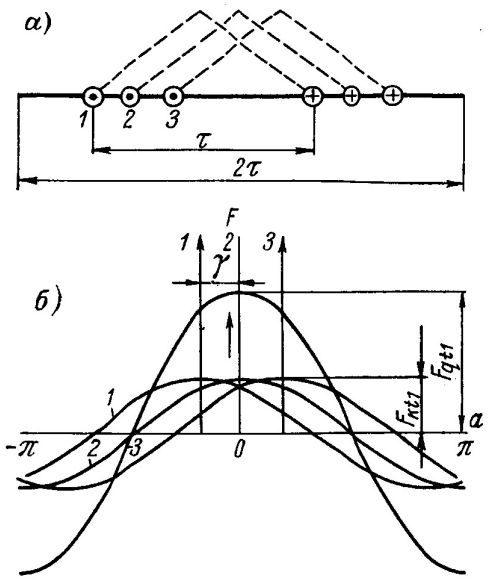


Рисунок 2.6 – Намагничивающие силы группы катушек с полным шагом

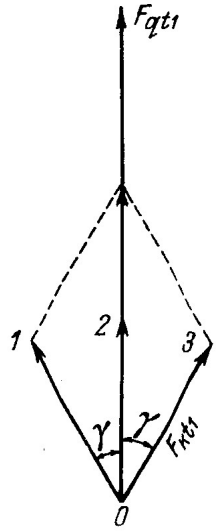


Рисунок 2.7 – Сложение намагничивающих сил группы катушек

При трехфазном токе мы имеем на якоре машины три системы обмоток, сдвинутых в пространстве на углы 120° и 240° и питаемых синусоидальными токами, сдвинутыми во времени на те же углы. Для таких обмоток могут быть написаны следующие уравнения н. с., если выбрать начало координат по оси фазы А

$$F_{A(t,a)} = (F_{\phi 1}\cos a + F_{\phi 3}\cos 3a + F_{\phi 5}\cos 5a + ... + F_{\phi \nu}\cos \nu a + ...)\sin t'; \qquad (2.26)$$

$$F_{B(t,a)} = (F_{ф1}\cos(a-\frac{2\pi}{3}) + F_{ф3}\cos 3(a-\frac{2\pi}{3}) + F_{ф5}\cos 5(a-\frac{2\pi}{3}) + ...$$
$$...+ F_{фν}\cos ν(a-\frac{2\pi}{3}) + ...)\sin(t'-\frac{2\pi}{3}); \quad (2.27)$$

$$F_{C(t,a)} = (F_{ф1}\cos(a-\frac{4\pi}{3}) + F_{ф3}\cos 3(a-\frac{4\pi}{3}) + F_{ф5}\cos 5(a-\frac{4\pi}{3}) + ...$$
$$...+ F_{фν}\cos ν(a-\frac{4\pi}{3}))\sin(t'-\frac{4\pi}{3}), \quad (2.28)$$

где $t' = \omega t$.

Результирующая н. с. для каждой гармонической в отдельности может быть найдена сложением данных гармонических всех трех фаз. Для основной гармонической н. с. трехфазной обмотки получаем следующее выражение

$$F_{1(t,a)} = \frac{3}{2}F_{ф1}\sin(\omega t - a) = F_1\sin(\omega t - a). \quad (2.29)$$

Откуда следует, что основная гармоническая результирующей н. с. трехфазной обмотки представляет собой уже не пульсирующую в пространстве волну, как для одной фазы обмотки, а правобегущую волну по окружности статора. Амплитуда этой волны равна результирующей н. с. основной гармонической на один полюс

$$F_1 = \frac{3}{2}F_{ф1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}\frac{\omega k_{об1}}{p}I = 1{,}35\frac{\omega k_{об1}}{p}I. \quad (2.30)$$

Таким образом, при наличии на статоре трех синусоидальных н. с., сдвинутых друг относительно друга на 120° и пульсирующих со сдвигом во времени на 120°, каждую из них можно заменить двумя бегущими в противоположные стороны синусоидальными н. с. с амплитудами, равными половине амплитуды пульсирующей н. с. При этом н. с., бегущие в сторону, противоположную вращению ротора, взаимно уничтожаются, как смещенные друг относительно друга на 120°, а н. с., бегущие в сторону вращения ротора, совпадают друг с другом и дают результирующую синусоидальную н. с., бегущую синхронно с ротором с амплитудой, равной $^3/_2$ максимальной амплитуды пульсирующей н. с.

Аналогичным образом можно сложить н. с. любой высшей гармонической всех трех фаз. Для гармонической порядка $ν$

$$F_{aν} = \frac{3}{2}F_{фν}\sin(\omega t \pm νa) = F_ν\sin(\omega t \pm νa), \quad (2.31)$$

где
$$F_ν = \frac{3}{2}F_{фν} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}\frac{\omega k_{обν}}{νp}I = 1{,}35\frac{\omega k_{обν}}{νp}I. \quad (2.32)$$

Результирующая н. с. трех фаз, включающая все гармонические,

$$F_{[t,a]} = F_1 \sin(t' - a) + F_5 \sin(t' + 5a) + F_7 \sin(t' - 7a) + F_{11} \sin(t' + 11a) + \\ + F_{13} \sin(t' - 13a) + ... + F_\nu \sin(t' \pm \nu a). \quad (2.33)$$

В выражении результирующей н. с. (2.33) все гармонические порядка $\nu = 3k$ (кратные трем) исчезают [220]. Все гармонические порядка $\nu = 6k - 1$, т. е. $\nu = 5, 11, 17$, имеют множитель $\sin(t' + \nu a)$ и двигаются влево – против направления вращения основной волны. Все гармонические порядка $\nu = 6k + 1$, т. е. $\nu = 1, 7, 13, ...$, имеют множитель $\sin(t' - \nu a)$ и двигаются вправо, т. е. по направлению движения основной волны и ротора.

При равномерном воздушном зазоре и отсутствии насыщения магнитная индукция в зазоре пропорциональна н. с. При наличии зубцов и пазов магнитное поле искажается. На рисунке 2.8 сплошной линией показана кривая поля, создаваемая основной гармонической н. с., когда одна из поверхностей воздушного зазора является зубчатой. Если из этой кривой выделить основную гармоническую, то ее амплитуда B_m будет меньше амплитуды B'_m при равномерном зазоре. С достаточной точностью можно считать, что $B'_m/B_m = k_\delta$, где k_δ – коэффициент воздушного зазора [220, 235].

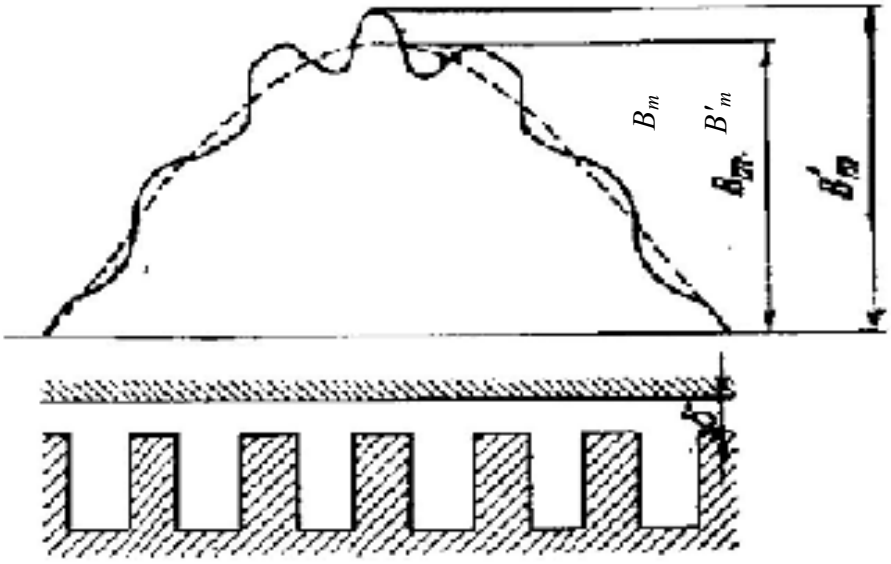


Рисунок 2.8 – Изменение кривой поля, вызванное наличием зубцов

Таким образом, при неравномерности зазора, вызванной наличием зубцов и пазов, а также с учетом насыщения стали для вычисления основной гармонической поля, созданной основной гармонической н. с., проводимость воздушного зазора нужно принять

$$\lambda_\delta = \mu_0 / (k_\delta \, k_\mu \, \delta), \tag{2.34}$$

где k_μ – коэффициент насыщения, определяемый по данным расчета магнитной цепи из кривой холостого хода машины.

Сложнее обстоит дело с высшими гармоническими н. с., на поле которых неравномерность зазора оказывает большее влияние. Неравномерность зазора приводит, кроме того, к появлению дополнительных гармонических поля, как это видно из рисунка 2.8.

2.2.3 Моделирование внешнего магнитного поля электрического двигателя при витковых и фазных замыканиях

Как было доказано выше, внешнее магнитное поле электродвигателя, образующееся в пространстве вокруг двигателя в процессе его эксплуатации, представляет собой отголоски мультипликативного поля магнитного зазора [2, 237]. Для удобства построения математической модели магнитного поля в воздушном зазоре электрического двигателя осуществим переход от магнитной индукции к напряженности, воспользовавшись известной зависимостью между индукцией и напряженностью магнитного поля.

Рассмотрим модель электрической машины, которая состоит из двух гладких коаксиальных цилиндров, выполненных из магнитного материала [235] (цилиндры разделены воздушным зазором δ, а внутренний радиус R цилиндра, соответствующего статору, равен единице), при известных распределениях линейной токовой нагрузки $A(a)$ вдоль окружности воздушного зазора и линий магнитной индукции в радиальном направлении, и найдем зависимость для напряженности магнитного поля в любой точке воздушного зазора с координатой a

$$\delta(H_a = H_0) = \int_0^a A(a) R da, \tag{2.35}$$

где H_0 находится из условия, что в воздушном зазоре машины не может возникнуть однополярный поток.

Для отыскания распределения линейной нагрузки вдоль окружности воздушного зазора рассмотрим магнитное поле, создаваемое одним проводником, расположенным в точке с координатами (1, a), по которому протекает ток i (рисунок 2.9).

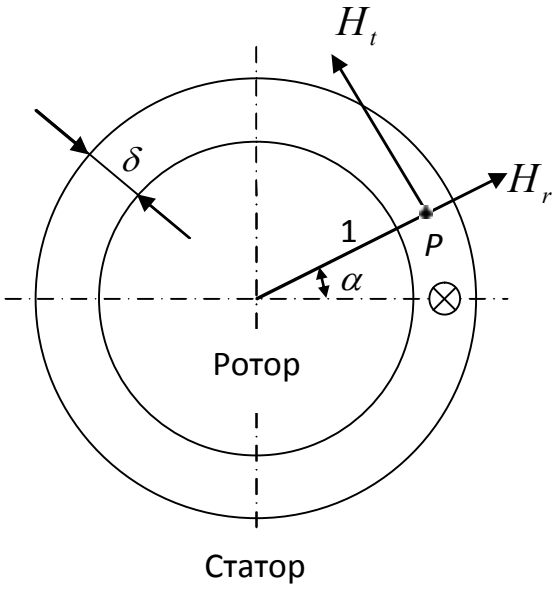


Рисунок 2.9 – Модель для расчета поля одного проводника электрической машины

Магнитное поле, создаваемое произвольной системой проводников, может быть получено методом наложения полей отдельных проводников. Напряженность результирующего поля в воздушном зазоре, определенная в системе координат с началом на оси витка для группы, состоящей из N витков, сдвинутых друг относительно друга на угол a_1, по которым протекает один и тот же ток i, является периодической функцией, которая может быть разложена в ряд Фурье [238, 239]

$$H(a) = \frac{2Ni}{\pi\delta}\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{1}{\nu}\sin\nu\frac{a_y}{2}\frac{\sin\nu N\frac{a_1}{2}}{N\sin\nu\frac{a_1}{2}}\cos\nu\left[a-(N-1)\frac{a_1}{2}\right], \qquad (2.36)$$

где $\nu = 1, 2, 3, \ldots$ – номера гармонических составляющих поля, из которых основная гармоника порядка $\nu = 1$ имеет период, равный 2π, т. е. полной длине окружности сердечника статора; a_y – угол сдвига друг относительно друга проводников витка, по которым протекает ток i в противоположных направлениях.

Тогда зависимость для напряженности поля в воздушном зазоре, созданного m-фазной обмоткой, когда токи в каждой группе витков имеют амплитуду $\sqrt{2}I$, угловую частоту ω и сдвинуты друг относительно друга на угол $(2/m)\pi$, примет вид [240]

$$H_m(a,t)=\frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{NI}{\delta}\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{1}{\nu}\sin\nu\frac{a_y}{2}\frac{\sin N\nu\frac{a_1}{2}}{N\sin\nu\frac{a_1}{2}}\left\{\frac{\sin(\nu+1)\pi}{\sin[(\nu+1)/m]\pi}\sin\left[(\omega t+\nu a)-\right.\right.$$
$$\left.\left.-\frac{m-1}{2}(\nu+1)\frac{2\pi}{m}\right]+\frac{\sin(\nu-1)\pi}{\sin[(\nu-1)/m]\pi}\sin\left[(\omega t-\nu a)+\frac{m-1}{2}(\nu-1)\frac{2\pi}{m}\right]\right\}. \quad (2.37)$$

Полученные в результате использования выражения (2.37) математические модели магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя позволили установить, что амплитуды гармонических составляющих напряженности поля ЭД зависят от конструктивных особенностей (параметров) рассматриваемой электрической машины, отклонений от показателей качества электроэнергии и в значительной мере определяются различного рода несимметриями обмоток и магнитной системы.

Таким образом, проведенные теоретические исследования внешнего магнитного поля показывают, что выбор параметров поля в качестве измеряемой величины при диагностике электродвигателей является наиболее целесообразным, т. к. в данном случае рассматривается прямой объект, характеризующий параметры электродвигателя при минимальных преобразованиях электрической энергии.

Полученная картина магнитного поля в воздушном зазоре ЭД позволила смоделировать ВМП двигателя при витковых и фазных замыканиях [238, 239]. При этом отметим, что указанные неисправности (электрическая и магнитная несимметрии обмоток статора и ротора) основательно исследованы, а их влияние на электромагнитные и другие физические процессы, в т. ч. на высшие гармонические и спектральные составляющие магнитных полей известно из теории электрических машин переменного тока [233]. Здесь же оно рассматривается на предмет получения диагностирующей информации на основе анализа данных, полученных из экспериментальных исследований этих неисправностей, проведенных по специальной методике.

Сущность методики заключается в том, что задавая неисправности искусственно, путем их физического моделирования, контролируются и анализируются изменения свойств динамических проявлений электромагнитных процессов в ЭД [241].

В результате проведения экспериментов на различных электрических двигателях было установлено, что неисправности обмотки машины существенно влияют на уровень ее ВМП, а именно, появляется третья гармоническая составляющая магнитного поля [234].

Для обоснования и целенаправленного анализа полученных экспериментальных данных рассмотрим физические процессы и явления при возникновении исследованных неисправностей в машине, основываясь на известных из теории электрических машин положениях и выводах.

Как было установлено, в симметричной трехфазной обмотке статора электрической машины образуется гармоника порядка $\nu = 6k \pm 1$, где $k = 0, 1, 2, 3, ...$ Н. с. каждой отдельной фазы обмотки статора представляет собой сумму неподвижных в пространстве и пульсирующих во времени всех гармонических составляющих (2.33).

Результирующая н. с. машины для каждой гармонической составляющей в отдельности является суммой соответствующих гармонических всех трех фаз. В условиях симметрии обмоток и нагружения машины симметричными токами в любой момент времени н. с., созданные токами третьей и кратных ей гармоник в обмотке статора, три фазы которой сдвинуты на 120°, совпадают по фазе, и их сумма равна нулю. Таким образом, хотя три фазные обмотки статора имеют свои пульсирующие во времени и неподвижные в пространстве н. с. третьей гармоники, результирующий поток от данной гармоники в воздушном зазоре машины отсутствует [242].

Наличие в фазных напряжениях или фазных токах обмотки статора электрической машины третьей гармоники обусловлено насыщением магнитной системы основным потоком намагничивания, определяемым значением намагничивающего тока. Ток намагничивания и соответствующий ему основной поток намагничивания при изменении нагрузки от нуля до номинальной практически не изменяются. Остается постоянной и третья гармоника, обусловленная насыщением магнитной системы указанным потоком. Таким образом, третья гармоника (и кратные ей) определенным образом является симметричной в фазных обмотках и фиксированной величиной в фазных величинах статора машины.

Однако при возникновении рассматриваемых неисправностей нарушаются электрическая и магнитная симметрии обмоток статора и ротора и, как следствие, определенным образом нарушается симметрия н. с. третьей гармоники в фазных обмотках. В этих случаях н. с. третьих гармоник в трех фазах статора представляют уже несимметричную систему, и их сумма не равняется нулю. В результате этого в пространстве воздушного зазора машины появляется результирующая н. с. частоты $3f_1$ (f_1 – частота сети), индуктирующая в обмотке статора ЭДС той же частоты.

При возникновении межвитковых и межфазных замыканий в обмотке статора в поврежденных фазных обмотках для токов третьей гармоники образуется отдельный самостоятельный замкнутый контур, где они будут циркулировать. Подобно эффекту, получаемому при соединении обмотки в треугольник, в поврежденных фазных обмотках должна происходить частичная компенсация высших гармонических составляющих, в т. ч. третьих гармонических. Благодаря этому, в фазных величинах поврежденных фаз значение данных гармоник должно уменьшаться по мере увеличения тока в короткозамкнутом контуре, т. е. по мере усиления степени тяжести этих повреждений [243]. Одновременно электрические замыкания в фазных обмотках должны привести к определенному увеличению значений третьей гармоники в

неповрежденных фазах, т. к. увеличение тока в короткозамкнутом контуре усиливает несимметрию токов в фазах. Это приводит к росту результирующего потока от токов третьей гармоники и, как следствие, к увеличению ЭДС.

Зная, что появление спектра гармоник напряженности в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем магнитном поле машины, можно сделать вывод, что признаком межвитковых и межфазных замыканий является наличие третьей и кратных ей гармоник во ВМП ЭД

[244]. Этот вывод совпадает с результатами экспериментальных исследований (рисунок 2.10).

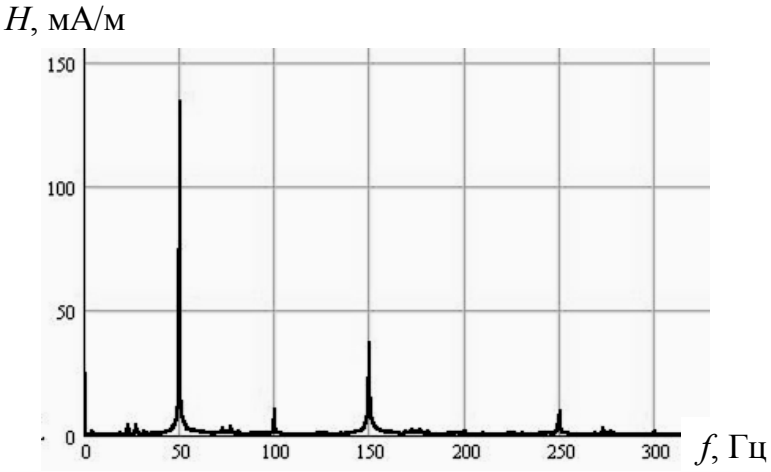


Рисунок 2.10 – Спектр гармоник напряженности ВМП при витковом замыкании

Другими словами, наличие во ВМП ЭД гармоник кратных трем является диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора [245]. При этом внешнее магнитное поле двигателя наиболее сильно проявляется в плоскости, перпендикулярной оси вала ротора [230].

Для подтверждения сделанных выводов, а также для более подробного исследования влияния различных факторов на картину внешнего магнитного поля электрической машины потребовалось разработать экспериментальную установку и методику проведения экспериментов, позволяющих моделировать факторы, влияющие на ВМП двигателя, и провести серии экспериментов по выявлению степени этого влияния.

2.3 Экспериментальные исследования зависимости параметров магнитного поля электродвигателя от степени развития дефектов

С целью проведения экспериментальных исследований зависимости параметров спектра напряженности внешнего магнитного поля от степени развития дефектов ЭД была создана лабораторная установка, структурная схема при-

борной базы которой приведена на рисунке 2.11 и включает в себя электрический двигатель, первичный преобразователь, экранированный кабель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), персональный компьютер (ПК), программное обеспечение для ПК [109, 216, 246].

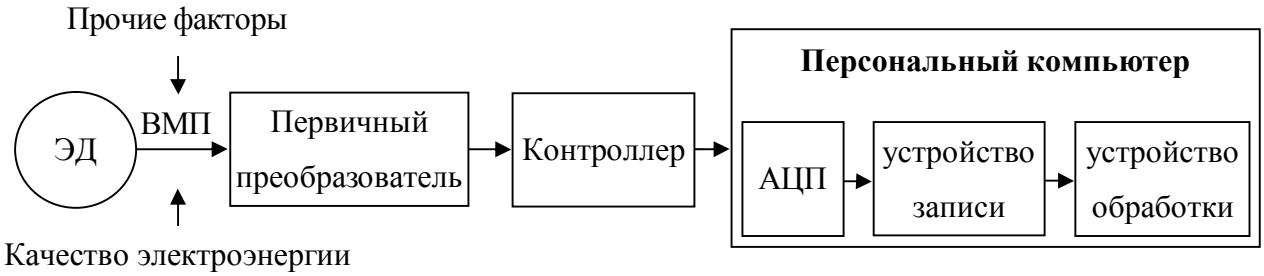


Рисунок 2.11 – Структурная схема приборной базы для проведения экспериментов

Помимо этого, была разработана экспериментальная установка (рисунок 2.12) по моделированию отклонений напряжения на одной и нескольких фазах, падения напряжения и несинусоидальности формы кривой напряжения при внутренних дефектах двигателя – межвитковом замыкании в определенной фазе, состоящая из блока моделирования отклонений, измерительного блока, АЦП и ПК. При этом для уменьшения до минимума влияния внешних наводок (фона) был произведен ряд ее модернизаций:

– применен защищенный от внешних полей кабель, соединяющий первичный преобразователь с персональным компьютером;
– произведено заземление корпуса ПК;
– применен первичный преобразователь со встроенным экраном;
– увеличено количество витков первичного преобразователя.

Анализ оставшегося после перечисленных операций фона, обусловленного собственными шумами ПК, показал отсутствие каких-либо периодических составляющих и его незначительный уровень (менее 1 % от основного сигнала), что не влияет на результаты опытов.

В основу методики проведения экспериментов было положено моделирование дефектов двигателя и отклонений показателей качества электрической энергии (ПКЭ) сети от нормированных значений [241, 247]. При этом для получения наиболее объективной информации и удобства анализа результатов исследования проводились в четырех состояниях:

– при отсутствии внутренних дефектов ЭД и нормированных значениях ПКЭ;
– при отсутствии дефектов ЭД и отклонении ПКЭ от нормированных значений;

– при наличии внутреннего дефекта и нормированных значениях ПКЭ;
– при наличии дефекта ЭД и отклонении ПКЭ от нормированных значений.

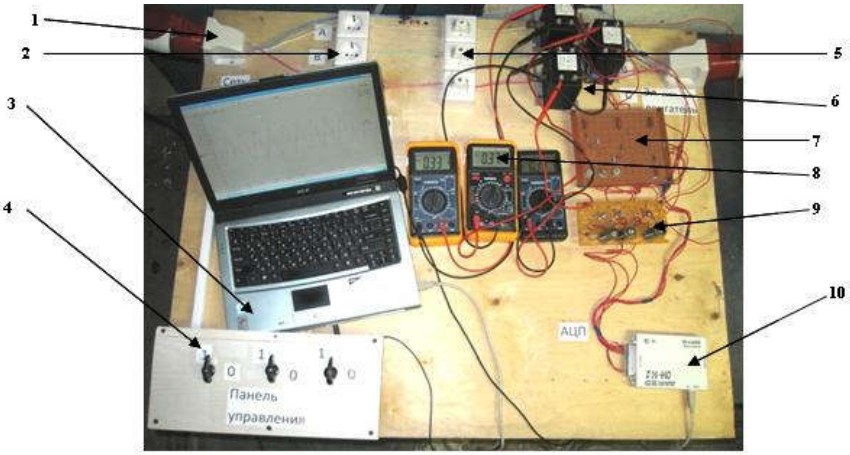


Рисунок 2.12 – Экспериментальная установка в сборе:
1 – розетка стационарная; 2 – розетка; 3 – ПК; 4 – пакетный выключатель; 5 – вилка; 6 – трансформатор тока; 7 – схема делителей напряжения; 8 – мультиметр; 9 – схема делителей напряжения; 10 – АЦП

Персональный компьютер с графической программой PowerGraph 3.3 через устройство АЦП позволил снимать 4 сигнала: сигнал с первичного преобразователя и с делителей напряжения, т. е. напряжения в 3 фазах сети. Кроме того, данная программа дала возможность проанализировать гармонический состав сигнала, а также зафиксировать точное значение амплитуд гармоник (рисунок 2.13). В свою очередь, устройство АЦП E14-440 является современным универсальным программно-аппаратным устройством для использования со стандартной последовательной шиной USB (Rev. 1.1) и предназначено для построения многоканальных измерительных систем ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в составе ПК. Данный модуль представляет из себя законченную систему с собственным процессором, позволяющую оператору реализовать специальные алгоритмы обработки сигналов на уровне программирования установленного на модуле цифрового сигнального процессора. Так как максимально допустимое входное напряжение на АЦП $U_{вх}$ = 10 В, то для измерения напряжений и токов были применены делители напряжений. Первичный преобразователь представляет собой катушку индуктивности конусовидной формы с 6000 витков, которая является нелинейным индуктивным сопротивлением.

Методика проведения экспериментов представляет собой последовательное выполнение логических операций, включающих в себя параллельное распознавание сигналов, полученных с АЦП и с вихретокового магнитометра

с помощью программы Power Graph, а также с мультиметров; калибровку показаний АЦП с помощью контрольного мультиметра M890C; поочередное моделирование отклонений ПКЭ (отклонение напряжения, несимметрия, изменение формы кривой и провалы напряжения) как с дефектами двигателя (межвитковое и межфазное замыкания), так и без них; определение по графикам спектра напряженности ВМП и напряжений на каждой из фаз пиков нечетных гармоник с 1-й по 11-ю [248]; занесение полученных данный в расчетные таблицы (таблицы 2.2 и 2.3).

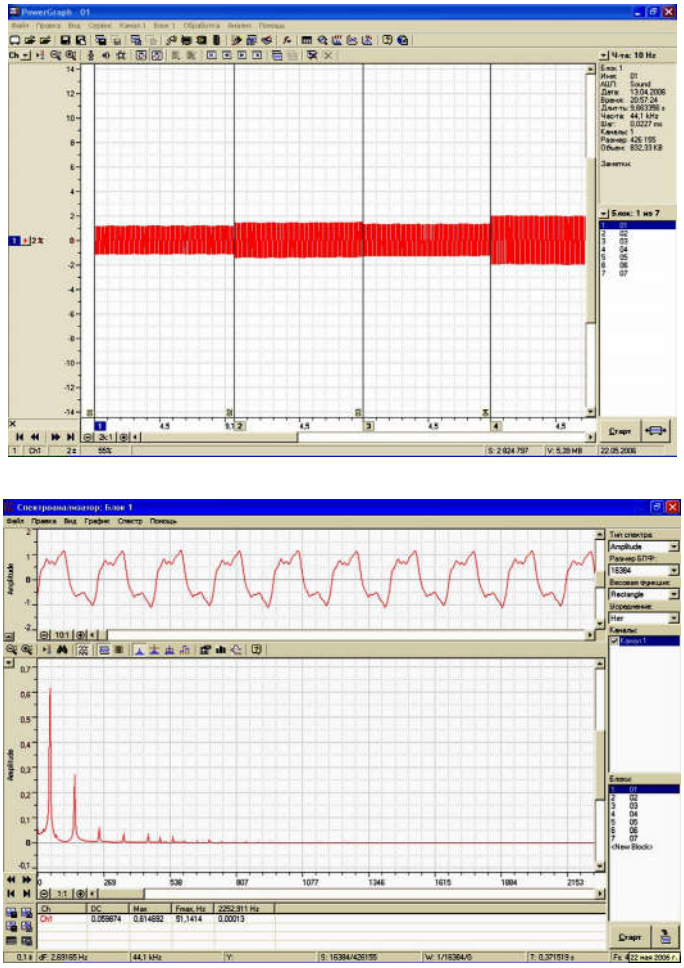


Рисунок 2.13 – Основное рабочее окно и внешний вид спектроанализатора программы PowerGraph 3.3

В основу обработки сигналов положены свойства Фурье-преобразования.

Моделирование дефектов электродвигателя осуществлено путем физического моделирования реальных процессов, происходящих в изоляции статора ЭД [241]. Искусственные замыкания в обмотках создавались при помощи предварительно выведенных наружу из лобовой части обмотки выводов (ри-

сунок 2.14). Для имитации переходного сопротивления изоляционного слоя в точке замыкания эти выводы замыкались через регулируемое активное сопротивление. Это позволило регулировать значение тока в короткозамкнутом контуре и получить различные степени тяжести исследуемых повреждений [2, 231, 249].

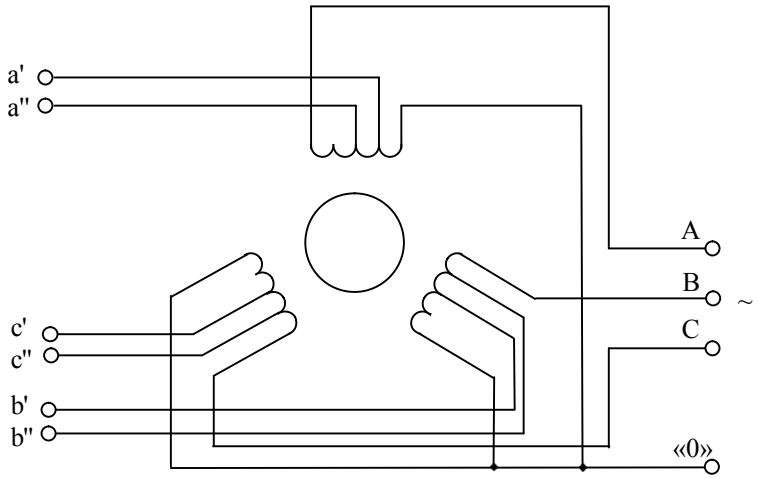


Рисунок 2.14 – Схематичное представление ЭД
с дополнительными выводами

Переменное активное сопротивление подключается к выводам a', a'', b', b'', c', c''. Так как максимально возможное значение выставляемого на реостате сопротивления составляло 1134 Ом, для исследований были выбраны сопротивления величиной 1000, 800, 600, 400, 200, 50, 0 Ом. Такой способ позволил моделировать тяжесть повреждения, место расположения и вид дефекта [229, 241]. Кроме того, для проведения экспериментов на двигателе выбрано восемь фиксированных точек (рисунок 2.15), в которых осуществлялись измерения напряженности ВМП. Меньшее количество точек не позволяет адекватно оценить полную картину ВМП.

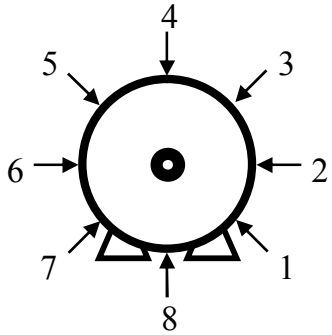


Рисунок 2.15 – Места измерения напряженности ВМП ЭД

Измерения напряженности внешнего магнитного поля двигателя производились в несколько этапов.

I этап. *Измерение напряженности ВМП бездефектного двигателя.*

Запись сигналов продолжительностью 10 секунд (меньшее время может дать не полную картину гармонического состава, что связанно со спецификой быстрого преобразования Фурье) производилась последовательно в каждой указанной точке.

Круговое измерение параметров поля повторялось пять раз для уменьшения погрешности от неточной установки первичного преобразователя. Амплитуды сигнала заносились в таблицу (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Значение амплитуды напряженности ВМП в выбранных точках

Позиция преобразователя	Значение амплитуды напряженности ВМП ЭД				
1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}
…	…	…	…	…	…
8	a_{81}	a_{82}	a_{83}	a_{84}	a_{85}

II этап. *Измерение напряженности ВМП при межвитковом замыкании.*

Моделирование дефекта первоначально производилось в фазе А. Для этого к выводам a', a'' (рисунок 2.14) подключался реостат и устанавливалось значение сопротивления, равное 1000 Ом. Замеры напряженности ВМП производились аналогично первому этапу. Значения заносились в таблицу, подобную таблице 2.3, и обрабатывались. Далее сопротивление реостата уменьшалось до 800 Ом. Серии замеров повторялись до установки сопротивления реостата, равного 0 Ом. Затем моделировался дефект в фазах В и С, а результаты обрабатывались аналогично.

III этап. *Измерение напряженности ВМП при межфазном замыкании.*

На данном этапе эксперимент аналогичен тому, что рассмотрен на втором этапе за исключением того, что реостат подключался к предварительно сделанным выводам от различных фаз. После этого полученные данные сводились в таблицу (таблица 2.3).

Кроме того, для подтверждения информативности полученного сигнала ВМП ЭД первоначально были проведены опыты по анализу качества напряжения, подводимого к электродвигателю. Для этого была использована активная нагрузка, включенная по схеме «звезда», которая подключалась к сети через трансформаторы тока, соединенные последовательно.

Таблица 2.3 – Значения амплитуды напряженности ВМП ЭД при межвитковом и межфазном замыканиях

Фаза, в которой моделировался дефект	Сопротивление реостата	Амплитуда напряженности ВМП ЭД			
	∞ (без дефекта)	$a_{1ср}$	$a_{2ср}$	…	$a_{8ср}$
A (B, C, A-B, A-C, B-C)	1000 Ом	$a_{1ср}$	$a_{2ср}$	…	$a_{8ср}$
	…	…	…	…	…
	0 Ом	$a_{1ср}$	$a_{2ср}$	…	$a_{8ср}$

Более того, был проведен ряд экспериментов, в ходе которых первичный преобразователь перемещали от двигателя на определенное расстояние и оценивали уровень снижения сигнала, резкое уменьшение которого свидетельствовало о том, что производится измерение ВМП именно данной электрической машины [245, 250, 251].

Далее, по табличным значениям, полученным в процессе измерения, по описанной методике строились диаграммы и проводился спектральный анализ в точках с наибольшим значением амплитуды. Результаты представлены на рисунках 2.16 – 2.18.

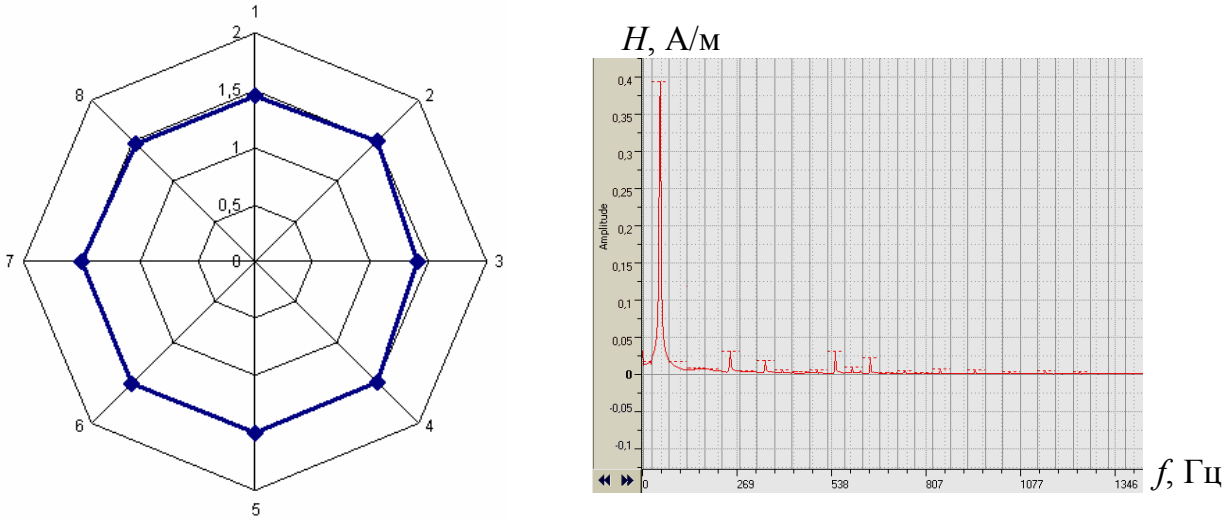


Рисунок 2.16 – Картина напряженностей и гармонический состав ВМП вокруг двигателя без дефекта

На рисунке 2.16 видно, что амплитуда напряженности ВМП вокруг электродвигателя на равноудаленных точках почти одинаковая и близка к идеальному. При рассмотрении гармонического состава можно увидеть, что амплитуда основной гармоники (50 Гц) ярко выражена, а амплитуды остальных имеют небольшую величину или не присутствуют вовсе.

Из рисунка 2.17 следует, что картина внешнего магнитного поля электрического двигателя меняется в зависимости от места расположения дефекта. При анализе гармонического состава сигнала в точках наибольшей амплитуды вы-

явлено, что его характер не зависит от расположения межвиткового замыкания и почти одинаков.

На рисунке 2.18 изображен гармонический состав напряженности ВМП ЭД при межвитковом замыкании, на котором заметно, что амплитуда первой гармоники уменьшилась почти в два раза, амплитуды же 3, 5 и 9 выросли. При этом амплитуда 7 гармоники осталась без изменения относительно бездефектного двигателя.

При анализе результатов, приведенных на рисунке 2.19, установлено, что картина внешнего магнитного поля электродвигателя также меняется в зависимости от фаз, между которыми имеет место межфазное замыкание. При анализе же гармонического состава сигнала (рисунок 2.20 *а*), замеренного в точке наибольшей амплитуды ВМП, легко заметить, что амплитуда 1-й гармоники уменьшилась незначительно, 3, 7 и 9 гармоники увеличили свои амплитуды, а амплитуда пятой осталась без изменения.

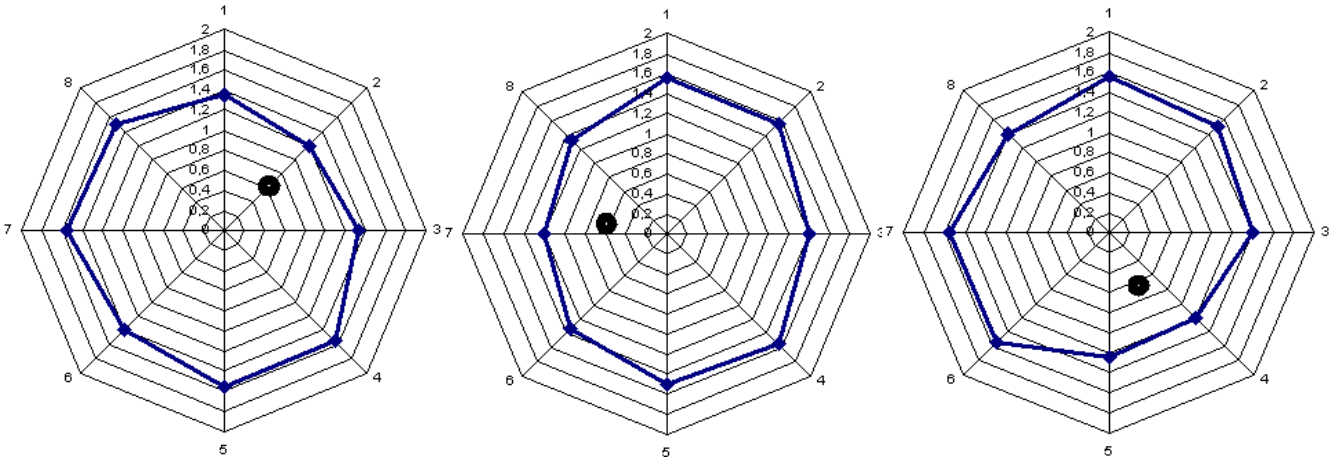
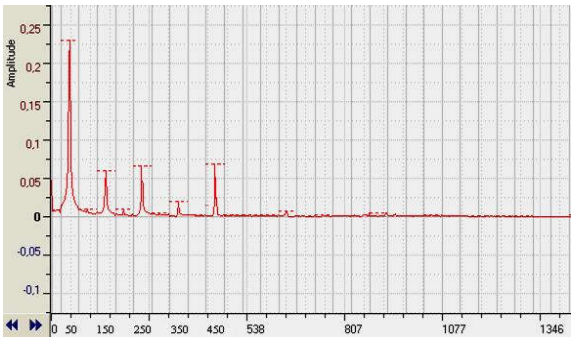


Рисунок 2.17 – Картина напряженностей ВМП вокруг двигателя с межвитковым замыканием в катушке фаз А, В и С

H, А/м



f, Гц

Рисунок 2.18 – Гармонический состав ВМП ЭД при межвитковом замыкании

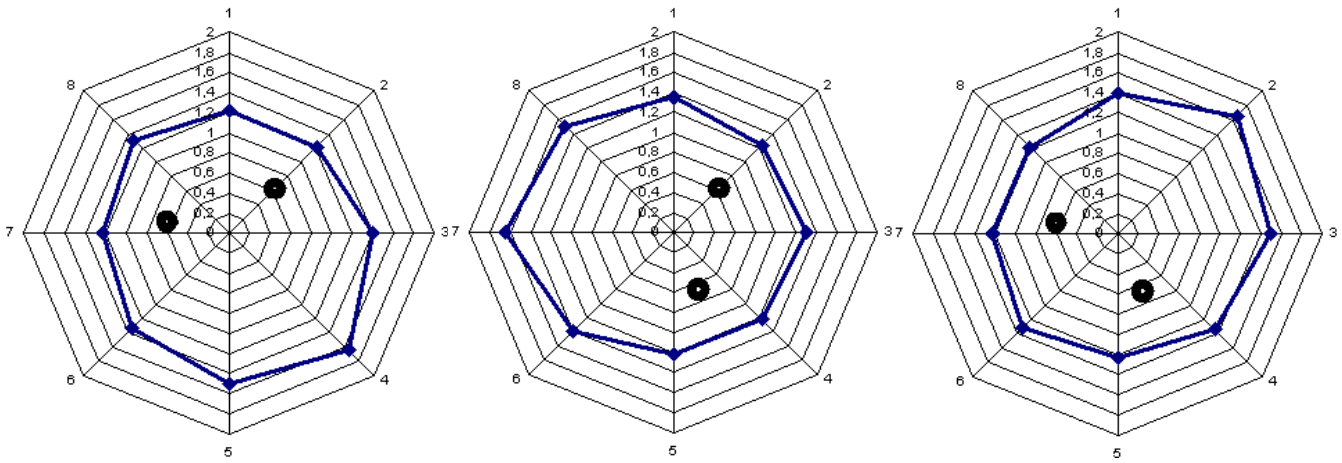


Рисунок 2.19 – Картина напряженностей ВМП вокруг двигателя при межфазном замыкании между фазами А – В, А – С и В – С

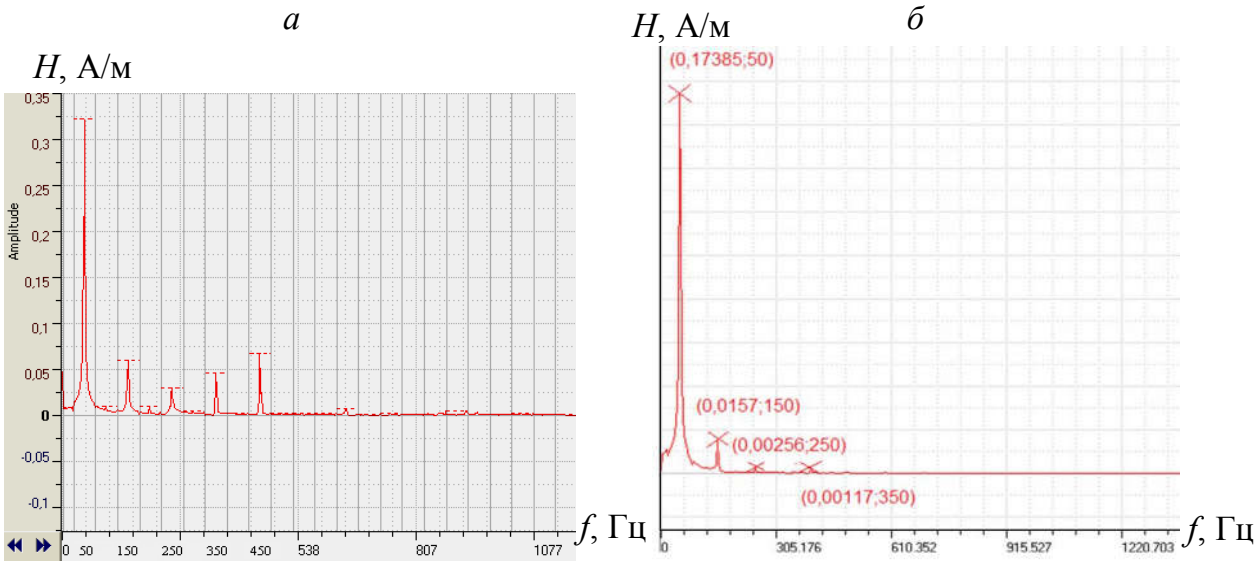


Рисунок 2.20 – Гармонический состав напряженности ВМП ЭД: *а* – при межфазном замыкании; *б* – при дефекте ЭД и падении напряжения на фазе В

Степень развития дефекта, в свою очередь, определяется с помощью информационно-логического анализа, позволяющего оценить остаточный ресурс ЭД [249, 252].

На рисунке 2.20 *б* изображена разложенная в спектр гармоник напряженность ВМП при дефекте ЭД и падении напряжения на фазе В, по которому производилось вычисление амплитуд основных информативных гармоник с 1 по 11 (соответственно 50, 150, 250 Гц и т. д.). Для обеспечения обработки информации о влиянии значений показателей качества электроэнергии на напряженность внешнего магнитного поля электродвигателя данные, получен-

ные с первичного преобразователя для каждой серии опытов, были сгруппированы в форме соответствующих таблиц [253].

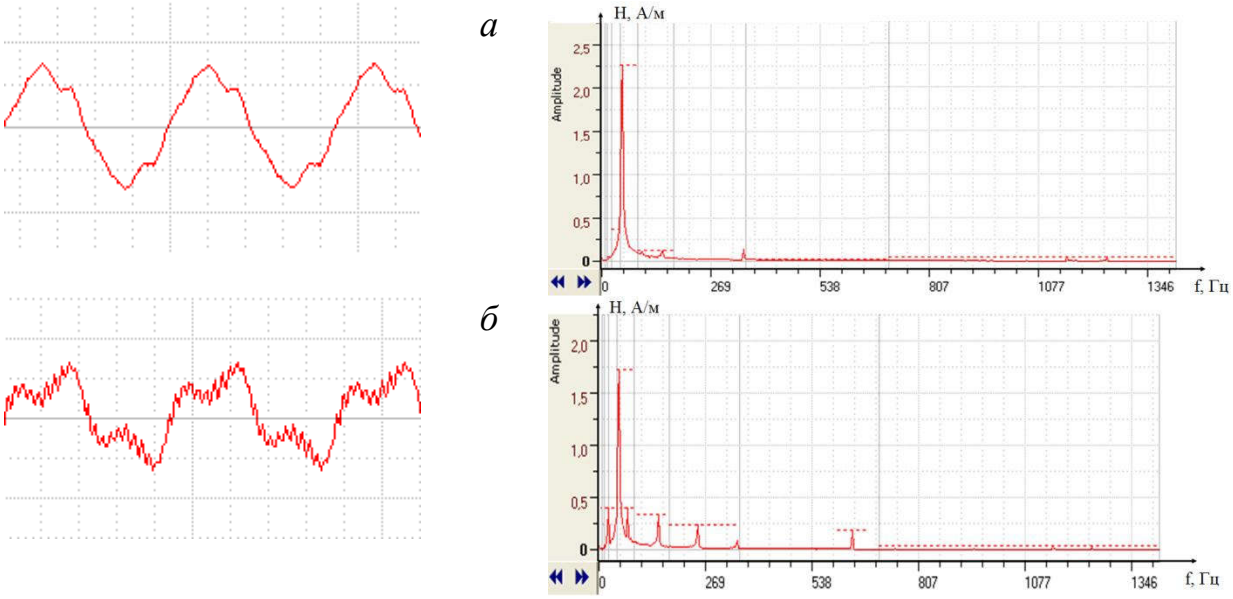


Рисунок 2.21 – Осциллограмма и спектральный состав напряженности ВМП ЭД: *а* – неисправность отсутствует; *б* – эксцентриситет вала ротора

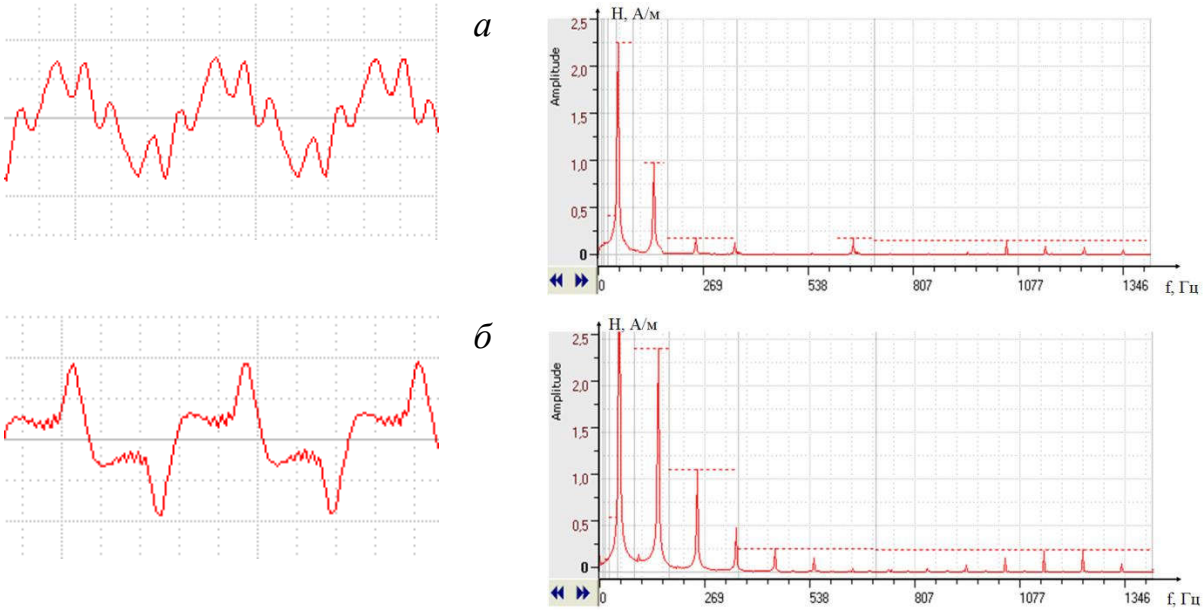


Рисунок 2.22 – Осциллограмма и спектральный состав напряженности ВМП ЭД при электрических неисправностях:
а – межвитковое замыкание; *б* – межфазное замыкание

Таким образом, при механических повреждениях двигателя (неравномерность воздушного зазора при неисправностях подшипникового узла или искривлении вала) наблюдается возникновение четных гармоник в спектре напряженности ВМП ЭД (рисунок 2.21) [254]. При электрических неисправностях двигателя происходит рост нечетных гармоник относительно 1-й (рисунок 2.22). Однако при отклонении параметров напряжения от нормированных значений наблюдается лишь рост амплитуды основных гармоник без изменений соответствующих коэффициентов (рисунок 2.23).

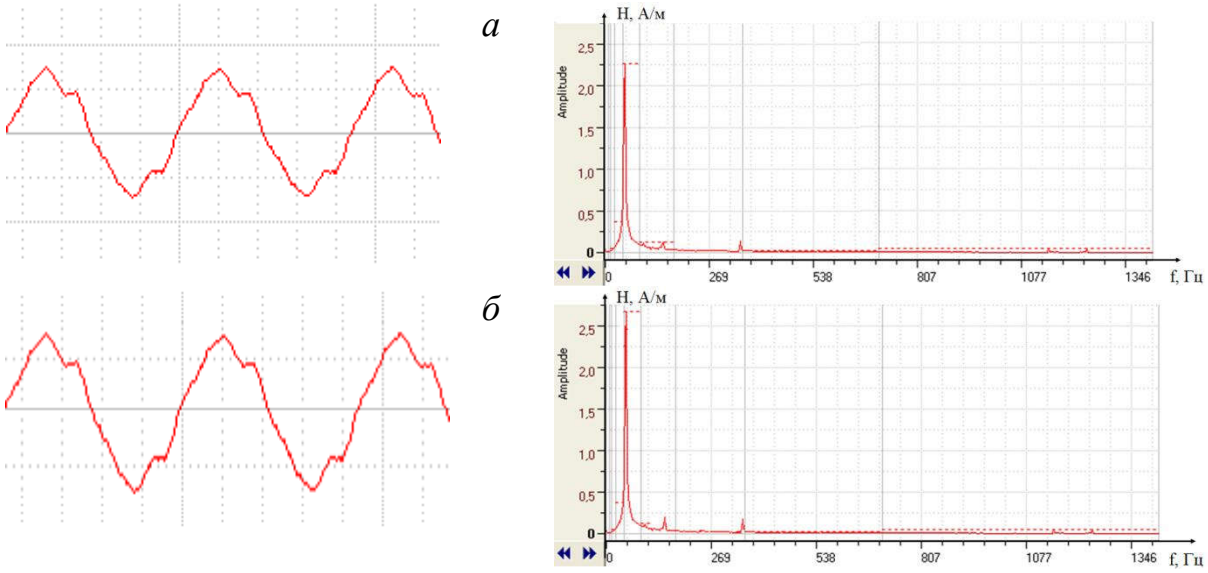


Рисунок 2.23 – Осциллограмма и спектральный состав напряженности ВМП ЭД при отклонении параметров напряжения от показателей качества электроэнергии: *а* – неисправность отсутствует; *б* – несимметрия напряжения

Как видно из приведенных выше рисунков, существуют четкие различия между картинами внешнего магнитного поля при влиянии различных факторов, что дает возможность определять дефект двигателя в каждом конкретном случае [254].

Полученные результаты экспериментов, доказывающие, что внешнее магнитное поле электрического двигателя можно использовать для его диагностики, полностью подтвердили адекватность разработанной математической модели. При этом обнаруженная зависимость между отклонением параметров напряжения от нормированных значений и картиной ВМП ЭД, оказывающая влияние на результат диагностики, позволила сделать вывод о том, что оценка состояния ЭД на основе измерения и дальнейшего сравнения лишь значений амплитуд гармоник напряженности ВМП нецелесообразна, для чего в качестве диагностического параметра необходимо рассматривать некий относительный параметр [238, 249, 255, 256].

2.4 Метод диагностики электрических двигателей на основе анализа спектра напряженности их внешнего магнитного поля

Принципиально все методики диагностики можно разделить на три группы:

- текущее значение диагностического параметра сравнивается со значением, полученным во время предыдущего измерения;
- текущее значение диагностического параметра сравнивается со значением, соответствующим критическому состоянию объекта, при котором еще сохраняется его работоспособность;
- текущее значение диагностического параметра сравнивается со значением, соответствующим эталонному техническому состоянию объекта.

В настоящее время широко используется первая из указанных методика диагностирования. Ее достоинством является возможность оценки изменения состояния изоляционной системы за заданный промежуток времени, что является важным при определении необходимости проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту. Основными недостатками этой методики являются необходимость ведения документации о состоянии изоляции ЭД и неопределенность текущего ее состояния.

Практическая реализация упомянутой выше комплексной диагностики будет максимально эффективной только в том случае, если заранее известны значения граничных параметров, т. е. значения, соответствующие наивысшей прочности (высокому качеству) изоляции, и значения совершенно противоположные, дальнейшее снижение которых приведет к полной потере свойств изолирующего материала. Другими словами, проблема заключается в том, что, с одной стороны, существуют методы, модели и технические средства диагностики изоляции, позволяющие эффективно, с высокой степенью достоверности диагностировать обмотки ЭД, а с другой – не установлены необходимые зависимости между значениями основных граничных параметров обмотки, отражающими состояние изоляции, диагностическими параметрами и параметрами конкретных электроизоляционных систем. Это ограничивает использование методов, изложенных в [90, 109], и затрудняет прогнозирование технического состояния изоляции или определения ее остаточного рабочего ресурса [119].

Решить данную проблему – не только значительно расширить возможности разрабатываемых методов комплексной диагностики, но и, главным образом, создать инструмент, позволяющий получить неограниченный доступ к исследованию процессов, происходящих в изоляции на протяжении всего срока службы.

В свою очередь, решение задачи прогнозирования состояния изоляции электродвигателя может быть осуществлено лишь при создании комплексной методики ее диагностики [257, 258]. Такая методика должна включать в себя как установление текущего состояния изоляции, так и сопоставление полученных значений диагностического параметра с уже известными. При этом необ-

ходимо отметить, что оценка технического состояния объекта зависит не только от метода диагностики и выбранного способа обработки получаемой в ходе измерений информации [259], но и от особенностей используемых технических средств. Разработанные при участии автора технические средства позволяют выделить два способа оценки состояния изоляции ЭД:

- периодическое измерение параметров напряженности ВМП ЭД и сравнение их с эталонным, где периодичность определяется технологическим процессом;
- постоянное измерение параметров поля с последующим сравнением полученных значений с предыдущим и/или эталонным (система мониторинга), что позволяет более детально наблюдать процессы дефектообразования в двигателе.

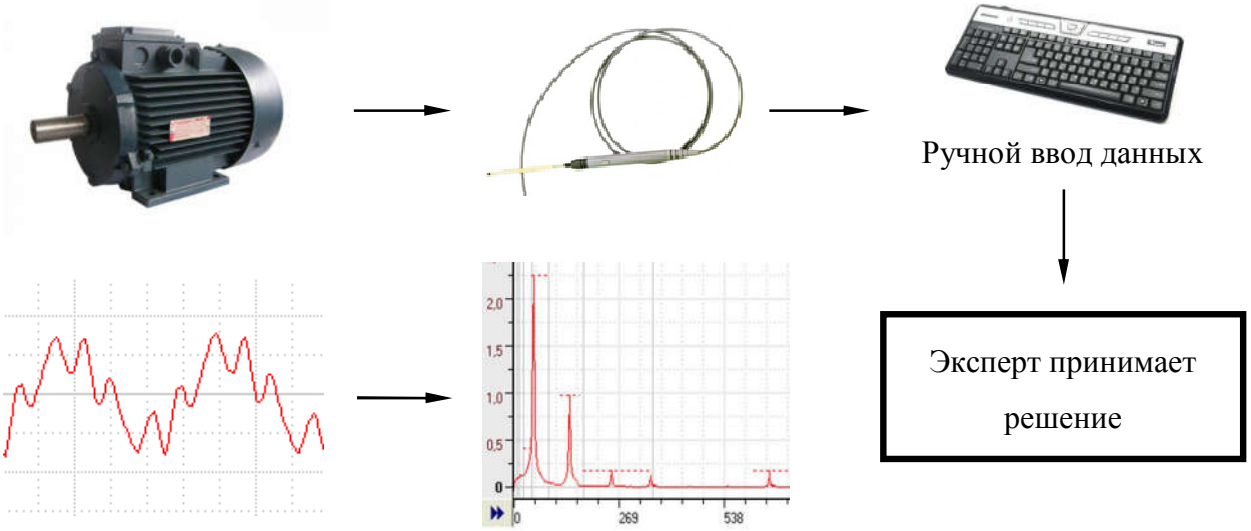
Структура предлагаемых методик диагностики приведена в таблице 2.4 [260].

Таблица 2.4 – Структура методик диагностики электрических двигателей

Периодическая диагностика (определяется технологическим процессом)	Система мониторинга (осуществляется постоянно при работе двигателя)
Порядок сбора и обработки диагностических данных	
1. Измерить напряженность ВМП разработанными техническими средствами. 2. Полученный сигнал разложить в гармонический ряд Фурье. 3. Используя полученные информационно-логические зависимости, определить ранг и степень развития дефекта(ов).	1. Измерить напряженность ВМП разработанными техническими средствами. 2. Полученный сигнал автоматически анализируется специальным программным продуктом на ПК. 3. При определении дефектности учитывается динамика изменения ВМП ЭД.
Диапазоны значений дефектности	
I ранг – дефект отсутствует; II ранг – незначительный уровень развития дефекта; III ранг – высокий уровень развития дефекта, необходимо срочное ТО; IV ранг – критическое развитие дефекта, дальнейшая эксплуатация не допустима.	

Существует несколько способов обработки диагностических данных. Самый простой из них заключается в измерении сигнала, проведении соответствующих расчетов и определении состояния двигателя, которые осуществляются человеком. Другой способ связан с автоматическим измерением диагностического параметра и сравнением полученного значения с содержащимся в памяти индивидуальной стационарно установленной системы мониторинга. Самый совершенный на текущий момент способ сбора и обработки диагностической информации связан с использованием экспертных систем (ЭС) интерпретации результатов диагностики [261].

Система периодической диагностики электродвигателей

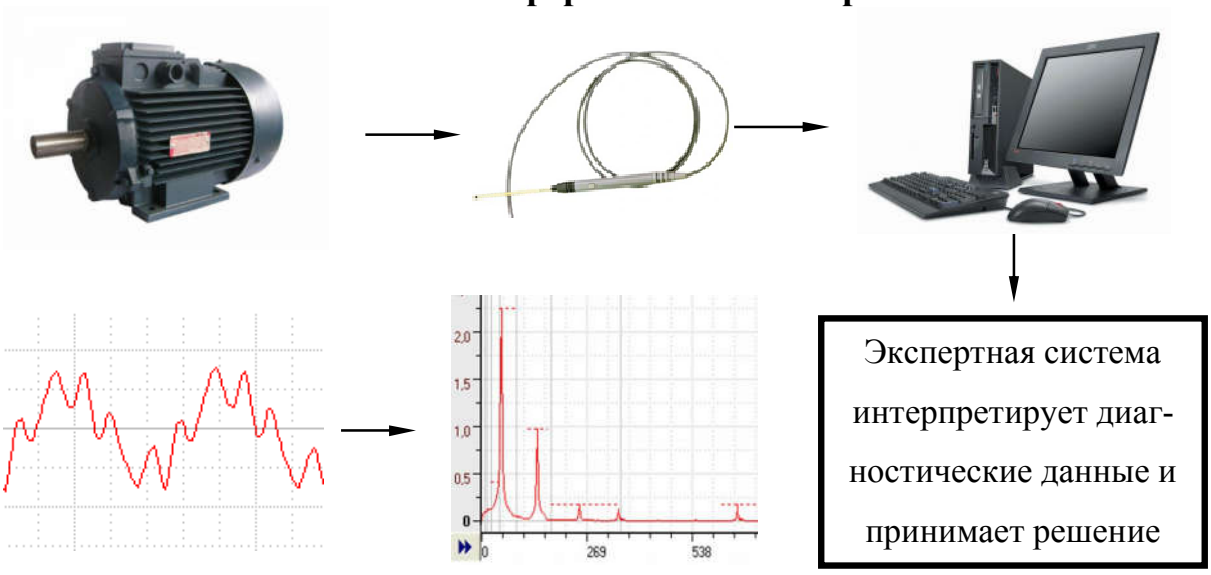


1. С помощью первичного преобразователя единовременно регистрируется напряженность ВМП ЭД

2. Сигнал анализируется вручную, раскладывается в гармонический ряд и производится расчет ранга дефектности

3. Оператор принимает решение о наличии и степени развития дефекта в двигателе

Система непрерывного мониторинга



1. С помощью первичного преобразователя постоянно регистрируется напряженность ВМП ЭД

2. Экспертная система автоматически вычисляет ранг дефектности

3. Экспертная система оценивает динамику изменения ВМП и принимает решение о наличии дефекта, сигнализируя оператору

Рисунок 2.24 – Варианты использования метода диагностики на основе анализа спектра напряженности внешнего магнитного поля ЭД

Таким образом, суть разработанного метода диагностики на основе анализа параметров спектра напряженности ВМП заключается в размещении рядом с двигателем электромагнитного преобразователя, позволяющего фиксировать внешнее магнитное поле, образующееся вокруг двигателя в процессе его работы и представляющее собой отголоски мультипликативного поля в магнитном зазоре ЭД. Сигнал с первичного преобразователя поступает на персональный компьютер, где он оцифровывается и записывается. Далее производится спектральный анализ полученного сигнала и по определенным характеристикам полученной картины вычисляется неисправность. При этом, как уже было сказано, разложение сигнала на гармоники осуществляется по методу «Быстрое преобразование Фурье» [262 – 264].

На сегодняшний день разработаны различные способы применения данного метода диагностики изоляции ЭД, представленные на рисунке 2.24 [265 – 267].

Для того, чтобы избежать влияния фактора отклонений параметров напряжения от нормированных значений, целесообразно рассматривать в качестве диагностического параметра не значения амплитуд напряженностей различных гармоник, а их отношение к первой гармонике (т. к. при этом факторе все гармоники меняют свои значения одинаково). При этом диагностируются только электрические и механические дефекты ЭД, что и является целью метода диагностики ЭД на основе анализа параметров спектра напряженности их внешнего магнитного поля [238, 255, 268].

Экономический эффект от внедрения разработанного метода диагностики был рассчитан на примере хозяйства ООО «ТОУРАК». В ходе расчета рассматривалось два варианта: эффективность работы предприятия до внедрения – базовый вариант (индекс «1») и после внедрения метода – предлагаемый вариант (индекс «2»).

В общем случае для сравнения вариантов технических решений необходимо располагать следующими обобщенными показателями [69, 269]: капитальными вложениями К, ежегодными эксплуатационными издержками И, потребительским эффектом Эп, который выражает конечный результат при использовании объектов.

С помощью данного набора показателей можно осуществить сравнительный экономический анализ решений. При этом распространены варианты, когда $К_2 > К_1$, $И_2 < И_1$ при одинаковости в обоих случаях потребительского эффекта $Эп_1 = Эп_2$.

В качестве показателя, который однозначно указывал бы на выгодность одного решения по сравнению с другим, используют отношение экономии на ежегодных эксплуатационных издержках к дополнительным капитальным вложениям

$$E = \frac{ДИ}{ДК}. \qquad (2.38)$$

Для выбора решения необходимо задать норматив сравнительной эффективности $E_н$. Тогда выбор будет экономически оправдан, если удовлетворяется условие

$$E >> E_н . \qquad (2.39)$$

При анализе нескольких вариантов можно использовать показатель приведенных затрат. Определение годового экономического эффекта Э основано на сопоставлении соответствующих приведенных затрат по базовому и предлагаемому вариантам

$$Э = З_1 - З_2 ; \qquad (2.40)$$

$$З_1 = C + И_{рем1} + И_{склад1} + И_{трансп1} + И_{простоя1} , \qquad (2.41)$$

где $И_{рем1}$ – затраты, связанные с ремонтом двигателей; $И_{склад1}$ – затраты, связанные с созданием складского запаса электродвигателей; $И_{трансп1}$ – затраты на транспортировку ЭД; $И_{простоя1}$ – затраты, обусловленные недовыпуском продукции; C – прочая себестоимость продукции (неизменна в обоих вариантах).

$$З_2 = C + И_{рем2} + K + И_{экспл2} + И_{аморт2} , \qquad (2.42)$$

где $И_{рем2}$ – затраты, связанные с ремонтом электродвигателей (снижаются за счет ТОиР на ранней стадии дефектности); $И_{экспл2}$ – затраты на эксплуатацию диагностического метода; $И_{аморт2}$ – затраты, обусловленные дополнительными амортизационными отчислениями; K – единовременные капитальные вложения.

$$Э = З_1 - З_2 = C + 71500 - C - 36300 = 35200 \text{ (руб.)};$$

$$E = \frac{ДИ}{ДК} = \frac{35200}{2300 + 6000} = 4{,}24 > E_н = 1 .$$

Тогда срок окупаемости $T_{ок} = \frac{1}{E_н} = 1$, т. е. срок окупаемости равен, ориентировочно, одному году.

2.5 Система технических средств диагностики на основе измерения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке двигателя

Как было указано выше, для электродвигателей широкое распространение получили методы контроля, диагностики и наладки, базирующиеся на измерении следующих параметров: к. п. д. двигателя, частоты вращения вала, вибрации машины, характеристик электромагнитного поля ЭД и др. Для эффективного использования результатов достоверной оценки технического со-

стояния электрических двигателей в процессе эксплуатации и ремонта можно выделить следующие основные требования, предъявляемые к системе повышения надежности ЭД [270]:

- использование в качестве параметров технического состояния изоляции обмоток электродвигателей на этапе обслуживания и ремонта диагностических параметров, определяемых при тестировании изоляции импульсом напряжения [4, 90];
- повышение эффективности функционирования комплекса организационно-технических мероприятий по восстановлению работоспособности двигателей за счет использования информационно-программного обеспечения [271];
- оптимальное насыщение сельскохозяйственных предприятий средствами диагностики и их совершенствование на базе новых методов контроля, а также создание диагностических региональных центров с участием заводов-изготовителей;
- выполнение диагностики при минимальном демонтаже электродвигателей и получение при этом более полного и достоверного объема информации о техническом состоянии ЭД по сравнению с традиционными методами.

Для соблюдения данных требований, как будет показано ниже, в работе решены следующие основные задачи [4, 58, 90, 270]:

1 Обоснована необходимость разработки эффективного метода диагностики изоляции электрических двигателей в процессе их обслуживания и ремонта, а также исследованы волновые затухающие колебания, возникающие при подаче на обмотку ЭД прямоугольного импульса напряжения [217, 272].

2 Построена и исследована математическая модель ВЗК с помощью параметров схемы замещения обмотки ЭД, характеризующих его изоляцию [90, 273].

3 Обоснована группа обобщенных диагностических параметров (ОДП), обеспечивающих как адекватную оценку текущего состояния изоляции двигателя [58, 274], так и прогнозирование ее дальнейшего состояния (рисунок 2.25) [275]:

$$\psi = (A_1 / A_2)T, \tag{2.43}$$

$$\Psi = \frac{T}{\ln \frac{A_1}{A_2}}, \tag{2.44}$$

где к диагностическим параметрам относятся: A_1 – амплитуда первого полупериода, В; A_2 – амплитуда второго полупериода, В; T – период колебаний, мкс.

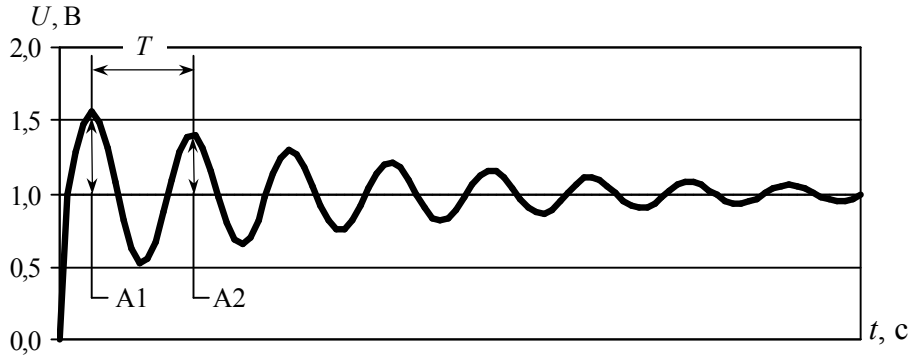


Рисунок 2.25 – Величины, используемые для получения группы обобщенных диагностических параметров

4 Разработан метод диагностики изоляции электрических двигателей, основанный на использовании зависимости изменения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке от состояния и степени старения изоляции [169, 218].
5 Разработаны и созданы новые современные технические средства диагностики изоляции обмоток ЭД [276, 277], а также обобщены результаты научных исследований в области диагностирования и прогнозирования состояния электрической изоляции и создан информационно-программный комплекс средств измерения и прогноза, ставший элементом системы повышения надежности двигателей [267, 278].

2.5.1 Теоретические исследования влияния конструктивных и внешних воздействующих факторов на параметры волновых затухающих колебаний в обмотке электродвигателя

Как известно, изоляция электродвигателей представляет собой многокомпонентную электроизоляционную систему, на которую в процессе эксплуатации действует комплекс различных факторов, приводящих к изменению ее состояния. Открытость системы и неоднородность ее состава обусловливает сложные связи между ее внешними и внутренними факторами. Данная система многокомпонентна не только по своим составляющим (межвитковая, межфазная, корпусная изоляция), но и по совокупности используемых материалов для ее производства (сочетание полимерных пленок, эмалевой изоляции, обмоточных проводов и пропитка этой композиции лаком, компаундом). Материалы диэлектриков, используемых при изготовлении современных изоляционных конструкций, характеризуются значительной неоднородностью структуры и различием электрофизических свойств в объеме материалов. Это обстоятельство обусловливает необходимость системного подхода при моделировании состояния обмоток при эксплуатации электродвигателей [43].

Как техническая процедура, диагностика изоляции в составе электроизоляционной системы сводится, главным образом, к оценке ее состояния с использованием специальных физических моделей, средств и методов диагностики наиболее важных с точки зрения надежности элементов. Так, например, для того, чтобы оценить состояние межвитковой изоляции, необходимо определить значения величин сопротивления межвитковой изоляции $R_в$ и емкости $C_в$ как показателей ее состояния. При этом известно, что параметры $R_в$ и $C_в$ реальной электроизоляционной конструкции являются распределенными и, соответственно, определить их значения путем прямых измерений невозможно. Поэтому в данном случае использовалось физическое моделирование процессов старения с применением косвенных измерений, которые являются более сложным видом измерений, т. к. полученные прямым измерением значения величин A_1, A_2, …, A_n, T_1, T_2, …, T_n связаны с искомой величиной известной зависимостью.

Таким образом, задача оценки состояния межвитковой изоляции как самого уязвимого элемента двигателя делится на две основные части – получение экспериментальным путем необходимого количества информативных параметров и расчет значений величин, адекватно отражающих состояние изоляции, т. е. $R_в$ и $C_в$.

Наиболее точно произвести оценку состояния межвитковой изоляции можно, воспользовавшись методом волновых затухающих колебаний [90]. Суть метода состоит в том, что на один вывод обмотки подается импульс напряжения заданной амплитуды и длительности, и измеряются значения параметров волновых затухающих колебаний, регистрируемых на другом выводе обмотки, после чего можно получить предварительные результаты о реальном состоянии изоляции обмотки [90]. В качестве типового входного сигнала принято единичное, ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях.

Согласно [36, 279, 280], в формировании ВЗК процесса все элементы обмотки участвуют по-разному. Так, индуктивность L и емкость C формируют значения периода T_f , а сопротивление R формирует значения амплитуды A_f. При этом любые возможные изменения свойств изоляции влекут за собой изменение значений параметров C, R обмотки и, следовательно, параметров ВЗК процесса T_f и A_f.

Для целей прогнозирования предпочтительно иметь один обобщенный диагностический параметр, характеризующий состояние всей изоляционной системы, а не группу параметров. Для нахождения оптимальной структуры обобщенного диагностического параметра по методу ВЗК необходимо рассмотреть факторы, воздействующие на затухающий колебательный процесс [274].

Как указано в [281], затухающий колебательный процесс может быть описан следующим выражением

$$s = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \qquad (2.45)$$

где $A = A_o e^{-\delta t}$ – амплитуда затухающих колебаний; δ – коэффициент затухания; ω – частота затухающего колебания; t – время затухания; φ – фаза колебания.

Основными характеристиками электрического колебательного контура являются R, L, C. Частота затухающего колебания определяется по следующему выражению

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}\,. \tag{2.46}$$

Частота связана с периодом по формуле

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}\,. \tag{2.47}$$

Если $A(t)$ и $A(t + T)$ – амплитуды двух последовательных колебаний соответствующих моментов времени, отличающихся на период, то отношение

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\delta t} \tag{2.48}$$

называется декрементом затухания, а его логарифм равен

$$\Theta = \ln\frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T\,. \tag{2.49}$$

Из выражения (2.49) можно выразить коэффициент затухания

$$\delta = \frac{\Theta}{T} = \frac{\ln\frac{A(t)}{A(t+T)}}{T}\,. \tag{2.50}$$

Модифицированный обобщенный диагностический параметр F, определяемый по выражению (2.50), предложен в работе [6]. Исходя из формул (2.45), (2.47) можно сделать вывод, что данный параметр с увеличением затухания колебания (ухудшением состояния изоляции) будет увеличиваться. Для описания процесса старения изоляции электродвигателя удобно использовать параметр, величина которого бы уменьшалась с течением времени. С этой целью предложен обобщенный диагностический параметр, представляющий со-

бой время релаксации затухающих колебаний и записываемый в виде (2.44). Кроме того, использование параметра F позволяет получить данные о степени изношенности изоляции, хотя на практике больший интерес представляет оценка остаточного ресурса работы узлов оборудования. Обобщенный диагностический параметр Ψ лишен указанных выше недостатков.

С другой стороны, на формирование волнового затухающего процесса при диагностике влияют параметры, описывающие конструкцию электродвигателей, число которых велико. Поэтому актуальной задачей является уменьшение их количества за счет исключения из рассмотрения параметров, влияние которых на выходной диагностический параметр отсутствует либо незначительно.

2.5.1.1 Математическое моделирование волновых затухающих процессов в обмотке при ее диагностике

Выполнение теоретических исследований влияния параметров конструкции на изменение ОДП невозможно без наличия простой и удобной в использовании математической модели волновых затухающих колебаний. Для исследования ВЗК процессов, протекающих в обмотке при подаче на ее вход прямоугольного импульса напряжения, целесообразно использовать схему замещения, которая может быть составлена для любой обмотки. При этом следует придерживаться допущения, согласно которому распределенные параметры обмотки заменяются сосредоточенными.

Рассмотрим построение схемы замещения обмотки статора электродвигателя. В общем случае параметры схемы замещения будут зависеть от конструкции ЭД при различном числе полюсов исполнения обмоток.

Схема замещения элементарного витка может быть представлена в виде двухполюсника, изображенного на рисунке 2.26.

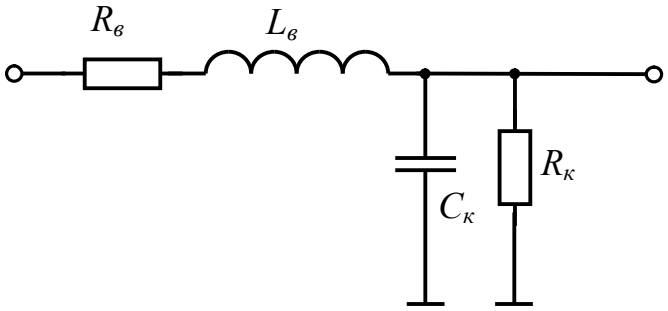


Рисунок 2.26 – Схема замещения элементарного витка

Объединяя схемы замещения витков и вводя параметры межвитковой изоляции получим схему замещения катушки. Полученная схема замещения катушки имеет много составляющих и неудобна при анализе. В связи с этим ее необходимо упростить. Поскольку катушка представляет собой совокупность замкнутых витков непрерывного проводника, то ее активное и индук-

тивное сопротивления будут определяться как сумма, соответственно, активных и индуктивных сопротивлений витков. Емкости изоляции витка относительно корпуса соединены между собой параллельно, в связи с чем данный параметр катушки будет определяться как

$$C_{кк} = \sum_{i=1}^{n} C_{кві} , \tag{2.51}$$

где $C_{кві}$ – емкость i-го витка относительно корпуса; n – количество витков.

В свою очередь, сопротивления изоляции витков относительно корпуса $R_{кві}$ также соединены параллельно. Поэтому справедливо выражение

$$R_{кк} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{кві}} , \tag{2.52}$$

где $R_{кк}$ – сопротивление изоляции катушки относительно корпуса.

При анализе межвитковых параметров, входящих в схему, установим допущение: межвитковое сопротивление $R_в$ и межвитковая емкость $C_в$ зависят, в первую очередь, от расстояния между проводниками. Аналитически это выражается как [281]

$$R_в = \frac{\rho \cdot d_в}{S} ; \tag{2.53}$$

$$C_в = \frac{\varepsilon_в \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d_в} , \tag{2.54}$$

где ρ – удельное сопротивление межвитковой среды; $d_в$ – расстояние между витками; S – условная площадь поверхности витков; $\varepsilon_в$ – диэлектрическая проницаемость межвитковой среды; ε_0 – электрическая постоянная.

Анализ (2.53) и (2.54) позволил установить, что для одинаковых марок провода, длины витка и неизменяющегося состава межвитковой среды на изменение значений $R_в$ и $C_в$ влияет величина параметра $d_в$: при удалении проводников друг от друга происходит падение емкости $C_в$ и рост $R_в$. Для нормальной работы электрической машины большое значение имеет сохранение целостности изоляционной конструкции. Нарушение ее целостности в обмотке ЭД может иметь место между витками, расстояние между которыми минимально. Поэтому рассмотрим подробнее свойства указанных параметров витков, лежащих в непосредственной близости друг от друга. Поскольку

$$X_{C_в} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_в}, \qquad (2.55)$$

то сопротивление цепи утечки тока через межвитковую изоляцию даже при удалении проводников друг от друга на незначительное расстояние возрастает в несколько раз. Следовательно, для проводников, находящихся на большем расстоянии друг от друга, характерна меньшая межвитковая емкость и большее межвитковое сопротивление, чем для близлежащих проводников. Условно можно принять, что сопротивление цепи утечки тока через межвитковую изоляцию при значительном расстоянии между проводниками равно бесконечности. Это означает, что при выполнении данного условия межвитковое сопротивление и межвитковая емкость образуют разрыв указанной цепи и должны быть исключены из схемы замещения. В результате анализа расположения проводников в пазу в схему замещения катушки включим межвитковое сопротивление и межвитковую емкость, характерные для пары проводников с минимальным расстоянием между ними.

При разработке схемы замещения фазы необходимо учесть следующее обстоятельство [36]: в электрических машинах достаточно учитывать взаимные влияния в пределах каждого паза, содержащего две секции двухслойной обмотки. Последние могут относиться к разным фазам или к разным участкам одной фазной обмотки.

В результате проведенных исследований получена схема замещения обмотки, представленная на рисунке 2.27. Данная схема аналогична предложенной в [112].

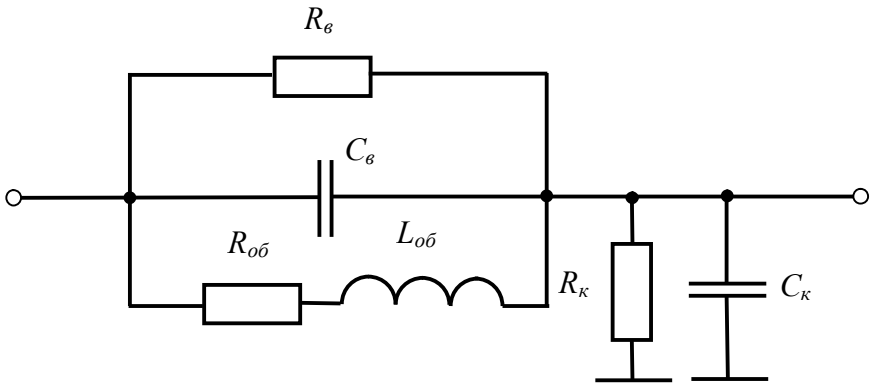


Рисунок 2.27 – Схема замещения обмотки электродвигателя

В [90] показано, что существенное влияние на ВЗК оказывают параметры генератора импульсов. Кроме того, там же проведено моделирование ВЗК с использованием операторного метода расчета переходных процессов в индуктивно-резистивно-емкостных контурах. Данный способ расчета является громоздким, что обусловливает неудобство его применения на практике. Поэтому, ак-

туальной задачей является создание простой и удобной в использовании методики расчета параметров ВЗК.

Построение математической модели ВЗК в обмотке произведем расчетом переходного процесса, возникающего при подаче на обмотку единичного импульса, с помощью классического метода. Расчет переходного процесса может быть выполнен отдельно для выходных параметров генератора и для параметров схемы замещения обмотки статора электродвигателя [282].

Расчет переходного процесса классическим методом производят в следующей последовательности [283]. Рассчитывают схему до коммутации, находят значения токов в индуктивности и напряжений на емкостях $i_{(-0)}; U_{C(-0)}$. Эти значения позволяют определить на основании законов коммутации независимые начальные условия $i_{(-0)} = i_{(+0)}$ и $U_{C(-0)} = U_{C(+0)}$. Далее рассчитывают схему после коммутации, находят принужденные составляющие искомых токов и напряжений, для этой же схемы составляют характеристическое уравнение и определяют его корни. Искомые величины представляют как сумму принужденных и свободных составляющих и вычисляют постоянные интегрирования. Начальные значения искомых величин и их производных, необходимых для вычисления постоянных интегрирования, находят с помощью независимых начальных условий и уравнений цепи [283].

Произведем расчет переходного процесса с учетом выходных параметров генератора импульсов, схема замещения которого представлена на рисунке 2.28.

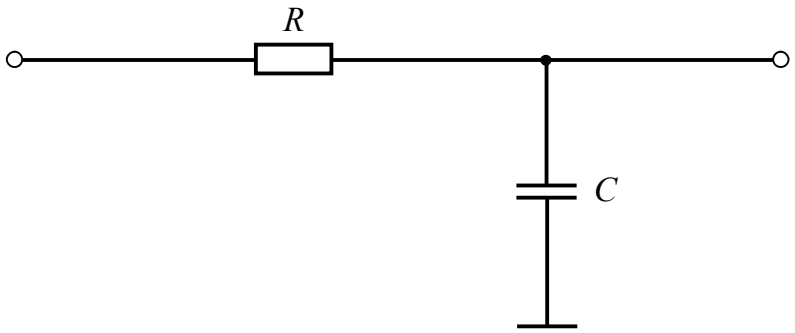


Рисунок 2.28 – Схема замещения генератора импульсов

До коммутации: $i_{(-0)} = 0$, $U_{C(-0)} = 0$,

где $i_{(-0)}$ – ток в момент времени, предшествующий коммутации.

После коммутации:

$$C \cdot R \cdot \frac{dU_{C.пр}}{dt} + U_{C.пр} = U_{вх}; \quad U_C = U_{C.пр} + U_{C.св}; \quad C \cdot R \cdot \frac{dU_{C.св}}{dt} + U_{C.св} = 0,$$

где $U_{C.пр}$ – принужденная составляющая напряжения.

Составляем характеристическое уравнение

$$p \cdot C \cdot R + 1 = 0; \quad p = -\frac{1}{C \cdot R} = -\frac{1}{\tau},$$

где τ – постоянная времени.

$$U_C = A_1 \cdot e^{p \cdot t} + U_{C.пр}, \qquad U_{C.пр} = U_{вх}; \qquad U_{C(-0)} = U_{C(0)} = 0 = A_1 + U_{C.пр};$$

$$A_1 = -U_{вх}; \quad U_C = -U_{вх} \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R}} + U_{вх}; \quad U_{вых1} = U_C = -U_{вх} \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R}} + U_{вх}.$$

Опуская промежуточные вычисления приведем результаты расчета переходного процесса для схемы замещения обмотки статора ЭД

$$U_{Ск.пр} = \frac{U_{вых1} \cdot R_{об} \cdot R_к + U_{вых1} \cdot R_в \cdot R_к}{R_в \cdot R_{об} + R_к \cdot R_{об} + R_к \cdot R_в}. \tag{2.56}$$

Общее решение системы дифференциальных уравнений, описывающей схему после коммутации, записывается как сумма свободной и принужденной составляющих

$$U_{Ск(+0)} = U_{Ск.св} + U_{Ск.пр}; \quad U_{Ск.св} = 0 - U_{Ск.пр}.$$

Составим характеристическое уравнение и определим его корни:

$$Z = \frac{\left(R_{об} + p \cdot L_{об}\right) \cdot R_в \cdot \frac{1}{p \cdot C_в}}{\frac{R_в}{p \cdot C_в} + \frac{R_{об} + p \cdot L_{об}}{p \cdot C_в} + \left(R_{об} + p \cdot L_{об}\right) \cdot R_в} + \frac{\frac{1}{p \cdot C_к} \cdot R_к}{\frac{1}{p \cdot C_к} + R_к} = 0;$$

$$\left(R_{об} \cdot R_в + p \cdot L_{об} \cdot R_в\right) \cdot \left(1 + R_к \cdot p \cdot C_к\right) + R_в \cdot R_к + R_к \cdot R_{об} + p \cdot L_{об} \cdot R_к +$$
$$+ p \cdot C_в \cdot R_в \cdot R_к \cdot R_{об} + p^2 \cdot C_в \cdot R_в \cdot L_{об} \cdot R_к = 0;$$

$$p_1 = \frac{-\left[\left(R_{об} \cdot R_в \cdot R_к \cdot C_к + L_{об} \cdot R_в + L_{об} \cdot R_к + R_в \cdot C_в \cdot R_{об} \cdot R_к\right) + \sqrt{D}\right]}{2 \cdot \left(L_{об} \cdot R_в \cdot R_к \cdot C_к + R_в \cdot C_в \cdot L_{об} \cdot R_к\right)}, \tag{2.57}$$

$$p_2 = \frac{-\left[\left(R_{об} \cdot R_в \cdot R_к \cdot C_к + L_{об} \cdot R_в + L_{об} \cdot R_к + R_в \cdot C_в \cdot R_{об} \cdot R_к\right) - \sqrt{D}\right]}{2 \cdot \left(L_{об} \cdot R_в \cdot R_к \cdot C_к + R_в \cdot C_в \cdot L_{об} \cdot R_к\right)}. \tag{2.58}$$

Если корни характеристического уравнения будут комплексными числами, то график переходного процесса будет колебательным и затухающим. Тогда

$$\begin{cases} U_{Ск.св} = A_1 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + \varphi\right); \\ U_{Ск.св} = A_1 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot t + \varphi\right) \cdot \left(-\delta\right) + A_1 \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot t + \varphi\right) \cdot \omega_0, \end{cases} \tag{2.59}$$

где δ – коэффициент затухания; ω_0 – частота затухания.

При $t = 0$ из второго уравнения (2.59) находим φ

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega_0}{\delta}\right); \quad A_1 = -\frac{U_{Ск.пр}}{\sin\varphi}.$$

$$U_{Ск.пр} = \frac{(R_{об} + R_в) \cdot R_к \cdot (-U_{вх} \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R}} + U_{вх})}{R_{об} \cdot R_в + R_{об} \cdot R_к + R_в \cdot R_к}. \tag{2.60}$$

С учетом рассчитанных схем, график переходного процесса определяется по выражению

$$U = U_{Ск.пр} + \frac{U_{Ск.пр}}{\sin\varphi} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi). \tag{2.61}$$

2.5.1.2 Математическое моделирование обмотки двигателя в зависимости от особенностей его конструкции

Обмотка статора электродвигателя, как и обмотки других электрических машин, имеет сложную конструкцию, от которой зависят ее электрические параметры. Для расчета электрических параметров обмотки ЭД, таких как индуктивность, емкость изоляции относительно корпуса, существует методика, подробно описанная в [36]. В нашем случае при моделировании ВЗК в обмотках низковольтных двигателей приняты следующие допущения: а) полузакрытый паз сложной овальной формы заменяется круглым закрытым пазом равной площади; б) случайное расположение проводников в пазу при всыпной обмотке заменяется регулярным; в) материалы проводников и сердечников принимаются однородными.

Интересующее нас межвитковое пространство обмотки электродвигателя состоит из многослойного диэлектрика: два слоя покровной эмали, один слой пропиточного лака и различных примесей [284]. Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков, представляющих собой смесь нескольких компонентов с разными диэлектрическими проницаемостями, может быть в первом приближении определена на основании логарифмического закона смешения, который в общем случае применим для расчета самых различных свойств [284 – 286]

$$\varepsilon_r^{\chi} = \sum_{i=1}^{n} \theta_i \cdot \varepsilon_{ri}^{\chi}, \tag{2.62}$$

где ε_{ri} – относительная диэлектрическая проницаемость i-го компонента смеси; θ_i – объемная концентрация i-ого компонента смеси; χ – константа, характеризующая распределение компонентов и принимающее значение от +1 до –1.

Сумма концентраций удовлетворяет условию $\sum_{i=1}^{n} \theta_i = 1$.

В частном случае, при последовательном соединении компонентов, когда χ = -1, имеет место выражение

$$\frac{1}{\varepsilon_r} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\theta_i}{\varepsilon_{ri}}. \tag{2.63}$$

В том случае, когда компоненты распределены хаотически (что наблюдается в технических диэлектриках, например, лаках), χ стремится к нулю. Продифференцировав уравнение (2.62) по χ получим

$$\ln\varepsilon_r = \sum_{i=1}^{n} \theta_i \cdot \ln\varepsilon_{ri}. \tag{2.64}$$

Рассмотрим случай, когда закончен технологический процесс производства или капитального ремонта электродвигателя. При этом эмаль представляет собой полностью высохший пленкообразующий материал, а лак – полностью полимеризовавшийся композиционный материал.

Свойства покровной полиэфирно-эпоксидной эмали на основе эпоксидных смол марок ПЭ939 и ПЭ943, применяемой для изготовления медных ПЭТВ-2, ПЭТВМ и алюминиевых ПЭТВА круглых проводов, а также медных проводов прямоугольного сечения ПЭТВП класса В, известны из [287]. При этом толщина эмали $\delta_{эм}$ варьируется в зависимости от диаметра обмоточного провода от 0,02 до 0,05 мм.

В свою очередь, свойства часто применяемых пропиточных лаков ГФ-996, МЛ-92, ФЛ-98 и других определены в [285 – 288].

Тогда появляется возможность используя выражение (2.64) рассчитать диэлектрические проницаемости вышеперечисленных лаков, предполагая, что их компоненты распределены хаотически.

Полученные данные по диэлектрической проницаемости лака позволили сформировать математические выражения для определения диэлектрической проницаемости межвиткового пространства. Для этого приняты следующие допущения [286]:

– каждый изоляционный слой имеет однородную структуру без посторонних включений (включений из проводящих или полупроводящих материалов);

– эмаль проводов не имеет механических повреждений и располагается равномерным слоем по всей поверхности провода.

На основе данных о лаке, а также разработанной модели межвиткового пространства с соответствующей диэлектрической проницаемостью [282], опуская промежуточные преобразования [44, 286], запишем формулу для определения диэлектрической проницаемости межвитковой изоляции

$$\varepsilon_{r.из} = \frac{1}{\dfrac{\theta_{лак}}{\varepsilon_{r.лак}} + \dfrac{\theta_{эм}}{\varepsilon_{r.эм}} + \sum_{i=1}^{n} \dfrac{\theta_i}{\varepsilon_{ri}}}, \tag{2.65}$$

где $\theta_{лак}$, $\theta_{эм}$ и θ_i – объемные концентрации лака, эмали и других элементов изоляции, равные отношению толщины данного элемента к толщине всей изоляции.

Результаты выполненных расчетов для эмали ПЭ939 (ПЭ943) и пропиточных лаков ФЛ-98, ГФ-996 и МЛ-92 показывают, что величина диэлектрической проницаемости межвитковой изоляции зависит, главным образом, от толщины вышеуказанных изоляционных покрытий.

Помимо диэлектрической проницаемости важным свойством изоляции является ее удельная проводимость. Так как межвитковая изоляция состоит из многослойного диэлектрика, для определения удельной проводимости воспользуемся логарифмическим законом смешения для параллельного включения компонентов

$$\rho_{виз} = \frac{1}{\dfrac{\theta_{лак}}{\rho_{лак}} + \dfrac{\theta_{эм}}{\rho_{эм}} + \sum_{i=1}^{n} \dfrac{\theta_i}{\rho_i}}, \tag{2.66}$$

где $\rho_{эм}$, $\rho_{лак}$, ρ_i – удельные объемные сопротивления эмали, лака и i-го компонента изоляционной конструкции; $\rho_{виз}$ – удельное электрическое сопротивление межвитковой изоляции.

Данная зависимость позволяет прийти к следующему выводу: величина удельного сопротивления в большей степени обусловлена меньшим значением удельного сопротивления компонента, входящего в изоляционную систему.

Как уже указывалось, электрическая емкость межвитковой изоляции является одним из основных параметров, характеризующих состояние изоляции и влияющих на волновой затухающий процесс в обмотке при диагностике [274].

Для нахождения значений межвитковой емкости воспользуемся упрощенной физической моделью межвиткового пространства, представляющей собой два параллельных бесконечно длинных проводника цилиндрической формы. Емкость определим между их отрезками длиной l, что равно длине витка обмотки статора двигателя.

Емкость между двумя уединенными проводящими телами равна отношению заряда q одного из тел к разности их потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ [289, 290]

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_r^{d-r} E \cdot dr - \int_{d-r}^{r} E \cdot dr = \int_r^{d-r} \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \frac{dr}{r} - \int_{d-r}^{r} \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \frac{dr}{r} =$$

$$= \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left(\ln \frac{d-r}{r} - \ln \frac{r}{d-r} \right) = \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left(\ln \frac{(d-r)^2}{r^2} \right) = \frac{\tau}{\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{d-r}{r},$$

где r – радиус обмоточного провода; d – среднее расстояние между двумя соседними витками обмотки.

Следовательно, емкость двух проводов определенной длины равна

$$C_в = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\tau \cdot \ln \frac{d-r}{r}} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{из} \cdot l}{\ln \left[\frac{(\delta_{из} + 2 \cdot r) - r}{r} \right]} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{из} \cdot l}{\ln \left[\frac{\delta_{из} + r}{r} \right]}, \qquad (2.67)$$

т. е. емкость зависит только от конфигурации тел, их размеров, расстояния между ними и электрических свойств диэлектрика (диэлектрической проницаемости ε_r).

Анализируя полученные результаты расчета, можно прийти к заключению, что свойства пропиточного состава влияют на межвитковую емкость. При этом расчет для изоляции асинхронного двигателя производился по данным, взятым из [291, 292]. Например, для ЭД 4А160S2У3 при пропитке его обмотки лаками МЛ-92, ФЛ-98 и ГФ-996 межвитковая емкость, соответственно, равна 110,4; 96,7 и 93,8 пФ.

Необходимо отметить, что расстояние между витками не является постоянной величиной даже у одного электродвигателя. Это, в первую очередь, выражается в различии сжимающих усилий, воздействующих на различные участки катушек обмотки, являющихся лобовыми частями и уложенными в пазы. Другой проблемой является то, что размеры пазов и обмоточных проводников различны у разных двигателей [274].

Для решения данных проблем проведен комплекс исследований, в ходе которых осуществлялось компьютерное моделирование размещения проводников в пазах и лобовых частях обмоток разных электродвигателей [267]. В результате установлено, что расстояние между проводниками зависит от диаметра провода

$$\delta_1 = \varpi \cdot d', \qquad (2.68)$$

где d' – диаметр провода с эмалью; ϖ – коэффициент межвиткового пространства, равный, в среднем, 0,421.

Используя предложенную методику расчета параметров физической модели изоляции можно найти значение межвитковой емкости конкретной ЭИС, являющееся эталонным, т. е. становится возможным определение верхнего значения основного параметра, характеризующего свойства межвитковой изоляции, соответствующего наивысшей ее прочности.

В свою очередь, расчет активного сопротивления межвитковой изоляции производится в два этапа. На первом этапе определяется удельное объемное сопротивление межвитковой изоляции. На втором – производится расчет активного сопротивления межвитковой изоляции [286]

$$R_в = \frac{\rho_{виз} \cdot \sum_{i=1}^{g} \delta_{вi}}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l \cdot \psi}, \tag{2.69}$$

где $\delta_{вi}$ – толщина i-го слоя межвитковой изоляции; r_1 – радиус провода без изоляции; g – количество слоев изоляции; ψ – поправочный коэффициент, учитывающий площадь соприкосновения проводников между собой и со стенками паза.

Найденная зависимость показывает, что с увеличением расстояния между проводниками наблюдается возрастание величины сопротивления.

В практике сельскохозяйственных предприятий, занимающихся ремонтом электрических машин, нередко при перемотке обмоток вместо проводов, предусмотренных ТУ для данного типа ЭД, используются иные провода. При этом значение индуктивности обмоток будет отличаться от табличного. Для оценки влияния изменений конструкции обмотки на волновой затухающий процесс необходимо иметь методику определения индуктивности.

Индуктивность обмотки электродвигателя может быть рассчитана по формуле

$$L_{об} = \frac{X_{11}}{\omega} = \frac{X_{11}}{2 \cdot \pi \cdot f}. \tag{2.70}$$

В общей теории электрических машин принято различать главное потокосцепление и потокосцепление рассеяния обмотки статора. В соответствии с этим для статора электродвигателя можно записать [293]

$$X_{11} = X_{1Г} + X_1, \tag{2.71}$$

где X_{11}, $X_{1Г}$, X_1 – полное, главное индуктивные сопротивления и сопротивление рассеяния, определяемые для различных конструкций ЭД согласно [293].

При изменении конструкции обмотки в ходе капитального ремонта ее активное сопротивление может быть рассчитано по следующему выражению [119]

$$R_{об} = \frac{\rho \cdot l_{ср} \cdot n_в}{s_{эл} \cdot n_{эл} \cdot a}, \qquad (2.72)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление проводника; $l_{ср}$ – длина витка; $n_в$ – количество витков в обмотке; $s_{эл}$ – сечение эффективного проводника; $n_{эл}$ – число элементарных проводников в эффективном; a – число параллельных ветвей обмотки.

Определить величину сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса можно путем рассмотрения многослойной диэлектрической конструкции. Интересующая нас изоляция обмотки электродвигателя относительно корпуса состоит из многослойного диэлектрика: слоя покровной эмали, слоя пропиточного лака, нескольких слоев волокнистых электроизоляционных материалов [286].

Для расчета свойств корпусной изоляции используем описанный выше логарифмический закон смешения. При этом к рассмотрению примем упрощенную модель многослойной изоляции, где толщина лака $\delta_{лак}$ меняется в пределах от 0 до 0,7 мм, а толщины остальных компонентов изоляционной конструкции равны нормируемым для данного типа электродвигателей.

Тогда, опуская промежуточные преобразования, сопротивление изоляции относительно корпуса можно определить по выражению

$$R_к = \frac{\rho_{киз} \cdot \sum_{i=1}^{f} \delta_{кi}}{4 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot n \cdot l_{паз} \cdot \psi}, \qquad (2.73)$$

где n – количество проводников, прилегающих к стенкам паза; $l_{паз}$ – длина сердечника статора; $\delta_{кi}$ – толщина i-го слоя корпусной изоляции.

Емкость относительно корпуса одной катушки обмотки можно приближенно рассчитать, принимая во внимание допущения, использованные при расчете сопротивления изоляции относительно корпуса [36]. По аналогии с выражением (2.67) емкость катушки относительно корпуса может быть определена по формуле

$$C_{кат} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{киз} \cdot 2 \cdot l_{паз}}{\ln \dfrac{\delta_{лак} + \delta_{эм} + \sum_{i=1}^{m} \delta_{кi} + r_{экв}}{r_{экв}}}, \qquad (2.74)$$

где $r_{экв} = r\sqrt{s}$ – радиус эквивалентного проводника; s – количество проводников в пазу.

Емкость одной фазы относительно корпуса рассчитывается по формуле [36]

$$C_{ф} = k_2 \frac{n}{6} C_{кат}, \tag{2.75}$$

где n – число пазов статора; $n/6$ – количество катушек в фазе; k_2 – коэффициент, учитывающий поправку на краевой эффект: k_2= 1,0 – для машин открытого исполнения и k_2=1,05-1,07 – для закрытых машин.

2.5.1.3 Анализ влияния внешних воздействующих факторов на параметры схемы замещения обмотки ЭД и обобщенный диагностический параметр

В общем случае, используя теоретический подход к описанию состояния ЭИС и учитывая ее реальную неоднородность, можно определить дефектность изоляции электрического двигателя через коэффициент пористости $K_{пор}$ [44].

В результате преобразования выражения (2.67) получим

$$C_{в} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot V_{из} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot l}{(V_{пор} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} + V_{эм} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{лак} + V_{лак} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм}) \cdot \ln\left[\frac{\delta_{из} + r}{r}\right]}. \tag{2.76}$$

Выразим из уравнения (2.76) объем пор

$$V_{пор} = \frac{\pi \cdot V_{из} \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot l \cdot \varepsilon_0}{\ln\left[\frac{\delta_{из} + r}{r}\right] \cdot C_{в} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак}} - \frac{V_{эм} \cdot \varepsilon_{возд}}{\varepsilon_{эм}} - \frac{V_{лак} \cdot \varepsilon_{возд}}{\varepsilon_{лак}}. \tag{2.77}$$

Таким образом, количественной характеристикой дефектности изоляции двигателей будем считать коэффициент пористости, определяемый по выражению [286]

$$K_{пор} = \frac{V_{пор}}{V_{из}} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_{возд} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot l \cdot \varepsilon_0}{\ln\left[\frac{\delta_{из} + r}{r}\right] \cdot C_{в} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак}} - \frac{V_{эм} \cdot \varepsilon_{возд}}{V_{из} \cdot \varepsilon_{эм}} - \frac{V_{лак} \cdot \varepsilon_{возд}}{V_{из} \cdot \varepsilon_{лак}}. \tag{2.78}$$

Равенство (2.78) отражает дефектность сухой изоляции, поры которой заполнены чистым воздухом. В случае увлажнения или загрязнения пор в материалах многослойной изоляционной конструкции выражение (2.78) примет вид

$$K_{пор} = \frac{V_{пор}}{V_{из}} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_{зс} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак} \cdot l \cdot \varepsilon_0}{\ln\left[\frac{\delta_{из} + r}{r}\right] \cdot C_в \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \varepsilon_{лак}} - \sum_{i=1}^{k} \frac{V_i \cdot \varepsilon_{зс}}{V_{из} \cdot \varepsilon_i}, \tag{2.79}$$

где $\varepsilon_{зс}$ – диэлектрическая проницаемость заполняющей поры смеси; ε_i – диэлектрическая проницаемость i-го слоя изоляции; k – количество слоев изоляции.

Межвитковую емкость при наличии загрязняющих примесей можно определить по выражению

$$C_в = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot V_{из} \cdot \prod_{i=1}^{k} \varepsilon_i \cdot l}{\sum_{i=1}^{k} \left[V_i \cdot \left(\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{k} \cdot \varepsilon_j \right) \right] \cdot \ln\left[\frac{\delta_{из} + r}{r}\right]}. \tag{2.80}$$

Межвитковое сопротивление при наличии примесей в обмотке

$$R_в = \frac{\left(V_{лак} \cdot \rho_{лак} + V_{эм} \cdot \rho_{эм} + \sum_{i=1}^{n} V_{зci} \cdot \rho_{зci} \right) \cdot \sum_{i=1}^{g} \delta_{вi}}{2 \cdot V_{из} \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l \cdot \psi}, \tag{2.81}$$

где $V_{зci}$ – объем i-го компонента загрязняющей смеси; $\rho_{зci}$ – удельное сопротивление i-го компонента загрязняющей смеси.

Проведенные исследования позволили получить ряд выражений, учитывающих воздействие концентрации веществ, содержащихся в окружающей среде, на значения параметров схемы замещения. Однако кроме химических, следует учитывать воздействие физических факторов. При этом полагаем, что в течение диагностирования значения параметров схемы замещения не изменяются, т. е. время диагностирования мало по сравнению со временем изменения физико-химических свойств изоляционной конструкции. В заданных ограничениях основным физическим фактором, значение которого подлежит учету, является температура обмотки. Получение зависимости как параметров схемы замещения, так и ОДП от температуры теоретическим путем представляет собой очень трудоемкую задачу. Поэтому в ходе экспериментальных исследований найдена температурная зависимость ОДП, определяемая выражением

$$\Psi_t = \frac{\Psi}{1 + 0{,}0004 \cdot \frac{\Psi_{эт}}{\Psi}(t - 20)} = k_{t\Psi} \cdot \Psi, \tag{2.82}$$

где $\Psi_{эт}$ – эталонное значение Ψ; Ψ_t – значение ОДП при температуре 20 °С; $k_{t\Psi}$ – температурный коэффициент, определяемый экспериментально.

Конечным результатом проведенных теоретических исследований явилось определение эталонных значений ОДП $\Psi_{эт}$ для каждого типа ЭД [294]. Расчет проводился с использованием описанной выше модели волновых затухающих колебаний. Исходными данными при расчете являлись значения параметров схемы замещения, найденные выше. Эталонные значения ОДП для различных двигателей серии 4А мощностью 0,55 – 55 кВт приведены в приложении Б.

Вместе с тем для прогнозирования технического состояния изоляции ЭД по окончании проведения ремонтно-восстановительных мероприятий автором предложено использовать модель старения изоляции, имеющую следующий вид [258, 275]

$$\widetilde{Щ}_{i+1} = л_1\widetilde{Щ}_i + b_{01}T_{возд} + b_{02}N_{агр.пр} + b_{03}\Phi_{обм} + b_{04}K_п + b_{05}V_{ст} + c_0 e^{c_1 t_{сл}} + d_1 w, \qquad (2.83)$$

где λ_1, b_{01}, b_{02}, b_{03}, b_{04}, b_{05}, c_0, c_1, d_1 – коэффициенты разностного стохастического уравнения; $T_{возд}$, $N_{агр.пр}$, $\Phi_{обм}$, $K_п$, $V_{ст}$ – интегральные характеристики условий эксплуатации (температуры окружающей среды, концентрации агрессивных примесей, увлажнения обмотки, количества пусков, вибрационной скорости статора электродвигателя); w – шум.

Подстановка в модель соответствующих нормированных значений ОДП позволяет получить остаточный срок службы ЭИС конкретного типа ЭД в заданных условиях эксплуатации [213, 257]. При этом ошибка прогнозирования составляет 10 – 15 %.

Использование выражения (2.83) для исследования старения изоляции позволило получить теоретические зависимости изменения ОДП от факторов, характеризующих различные условия окружающей среды и режимы работы электродвигателей, представленные на рисунке 2.29 *а*. Первая группа условий эксплуатации характеризуется нормальным режимом работы ЭД с воздействием влаги и вибрации, не превышающим установленные нормы. При эксплуатации в условиях второй группы двигатель подвергается влиянию незначительных перегрузок, повышенной влажности, вибрации и запыленности. Работа в условиях эксплуатации третьей группы сопряжена со значительными перегрузками, перегревом обмоток, повышенной влажностью, сильной вибрацией и воздействием химически агрессивных газов.

С целью проверки точности построения математических моделей проведена подконтрольная эксплуатация электродвигателей средней мощности серии 4А, занятых для кормоприготовления и кормораздачи в коровнике, являющихся приводами измельчителей, кормодробилок, бункерных и поперечных шнековых смесителей, горизонтальных и наклонных транспортеров, погрузчиков (рисунок 2.29 *б*).

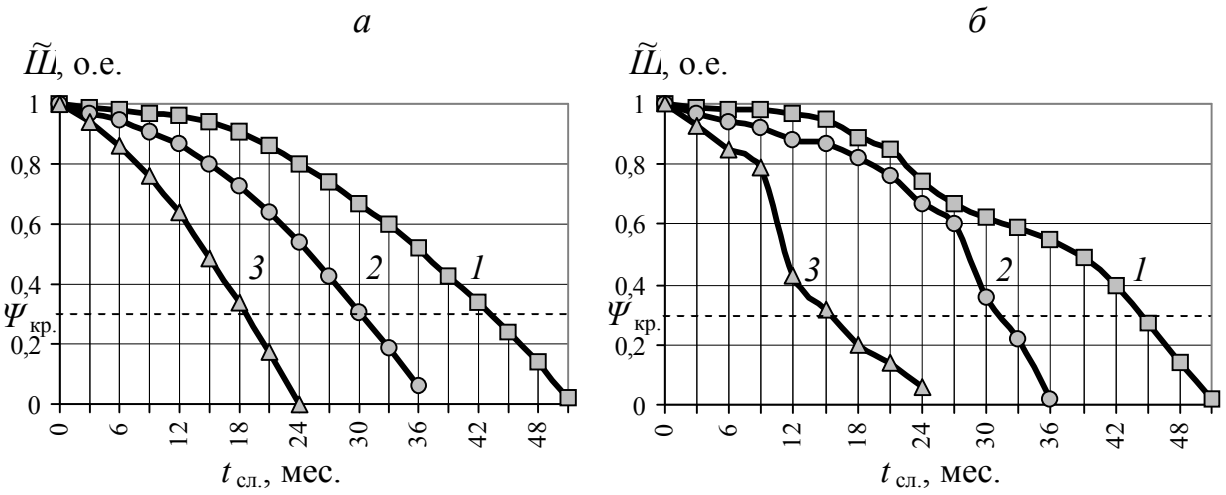


Рисунок 2.29 – Кривые изменения ОДП в зависимости от условий работы ЭД: *а* – теоретические кривые; *б* – при эксплуатации; *1*, *2*, *3* – 1-я, 2-я и 3-я группы условий

Сравнительная оценка зависимостей, представленных на рисунке 2.29, показала, что прогноз, осуществленный с помощью математических моделей для различных условий эксплуатации, точно описывает реальный процесс старения изоляции [272].

2.5.2 Метод оценки технического состояния изоляции электрических двигателей на основе анализа параметров волновых затухающих колебаний в обмотке

Оценка технического состояния электродвигателя методом волновых затухающих колебаний с использованием разработанных при непосредственном участии автора технических средств может быть осуществлена двумя способами [204, 272, 295]:

- измерение выходного сигнала с помощью прибора УПКИ – 01 и его последующее сравнение с эталонным значением при каждом включении двигателя;
- измерение параметров ВЗК с помощью прибора ИЗК – 01 с последующим их преобразованием в ОДП и сравнением с предыдущим и/или эталонным значением.

В ходе измерения параметров волновых затухающих колебаний полученные значения диагностических параметров A_1, A_2, и T переносятся из прибора в персональный компьютер, обрабатываются с помощью специального программного обеспечения, сравниваются с эталонными значениями, полученными в результате расчета по данным о двигателе, его типе, мощности и частоте вращения, в результате чего выдается полная информация не только о состоянии изоляции обмотки ЭД, но и другая важная информация [267, 294]. При этом

процесс нормального старения электрической изоляции характеризуется плавным уменьшением значений диагностических параметров на протяжении всего периода эксплуатации двигателя. Резкое, скачкообразное уменьшение Ψ, как правило, свидетельствует об увлажнении обмотки или о возникновении в ней дефектов.

В настоящее время увеличение количества единиц электрооборудования на сельскохозяйственных предприятиях вынуждает искать новые подходы к организации их диагностики. Современное развитие компьютерной техники и расширение возможностей передачи информации позволило эффективно использовать достижения в этой области для сбора и обработки диагностической информации [278].

Комплексный подход к преобразованию измеренных данных о состоянии изоляции ЭД позволил разработать систему сбора диагностической информации, представленную на рисунке 2.30, достоинством которой является то, что она позволяет собирать необходимую информацию при использовании как ручных приборов, так и современных автоматизированных диагностических систем (АДС) [295].

Для диагностики изоляции, контроля параметров и режимов работы электродвигателей с возможностью оперативного прогнозирования их состояния может быть использована автоматизированная диагностическая система, построенная по принципу расширенного измерительно-вычислительного комплекса и являющаяся составной частью всей системы [258]. При этом эффективная работа последней может быть обеспечена только при наличии системы сбора, передачи и обработки измерительной информации, предназначенной для использования на предприятиях АПК [190].

Система сбора диагностической информации включает в себя специальные диагностические модули (ДМ), которыми оборудуется каждый ЭД. В настоящее время разработаны модули двух типов: ДМ первого типа встраиваются непосредственно в распределительную коробку ЭД, а ДМ второго типа совмещаются с пусковой или защитной аппаратурой двигателя. Любой из типов ДМ имеет выходное передающее устройство, с которого данные через соответствующий канал передачи информации поступают на вход согласующего устройства (СУ) и, далее, передаются в персональный компьютер. Предусмотрено два способа передачи данных от ЭД к ПК – по кабельной линии и с помощью волновых бесконтактных способов передачи информации, например, инфракрасного (ИК) излучения [59, 296].

Перед тем как поступить на обработку в ПК, данные попадают на СУ, конструкция которого зависит от того, какой из способов передачи информации используется. Если это ИК-излучение, то СУ состоит из высокочувствительного

фотоэлемента и усилителя. С выхода СУ данные в виде аналоговых или дискретных сигналов подаются на вход специального коммутатора и, далее, либо непосредственно на вход звукового устройства ПК, либо на вход аналого-цифрового преобразователя ПК [295].

Рисунок 2.30 – Структурная схема системы сбора диагностической информации

Диагностические данные обрабатываются в ПК описанным выше программным обеспечением, в результате чего осуществляется оценка состояния изоляции ЭД и производится прогноз остаточного срока службы [59]. Таким образом, рассмотренный комплекс методов диагностики позволяет оценивать состояние двигателя на всех этапах его жизненного цикла от ввода в эксплуатацию до списания (рисунок 2.31).

Рисунок 2.31 – Структура использования разработанных методов диагностики

2.5.2.1 Измерители затухающих колебаний ИЗК

Учитывая достоинства и недостатки предыдущих устройств при непосредственном участии автора была разработана и создана серия приборов для предприятий сельского хозяйства – измерители затухающих колебаний (ИЗК) [217]. Приборы малогабаритны, питаются как от автономного, так и от внешнего источника [278]. Серия приборов диагностики изоляции ИЗК включает в себя три группы устройств, каждая из которых направлена на измерение параметров ВЗК ЭД определенного диапазона мощности: ИЗК-01 – 1,1-22 кВт; ИЗК-02 – 22-55 кВт; ИЗК-03 – 0,25-1,1 кВт [297, 298].

Приборы просты в конструкции и эксплуатации благодаря применению в качестве указателя измеряемых параметров ВЗК внешне подключаемого вольтметра. В приборах применено автоматическое переключение режимов работы, что позволило исключить дополнительные кнопки управления, и упростило работу с приборами. Информация о текущем режиме работы выводится на свето-

диодные семисегментные индикаторы. Внешний вид прибора ИЗК-01 представлен на рисунке 2.32.

Рисунок 2.32 – Внешний вид прибора ИЗК-01

При разработке и создании прибора ИЗК-01 использовался опыт предыдущих разработок и специализированная литература [299 – 311]. Прибор может питаться от двух источников: от сетевого блока питания для сети 220 В и от автономного источника на двух последовательно включенных батарейках типа 3336Л. Максимальный ток потребления при напряжении 9 В составляет 50 мА.

2.5.2.2 Устройство периодического контроля изоляции УПКИ

Данное устройство относится к приборам автоматической диагностики [312]. Оно имеет сравнительно малые размеры и размещается в пускозащитной аппаратуре двигателя. С его помощью осуществляется контроль состояния изоляции одного ЭД на протяжении всего срока его службы [88, 278]. Внешний вид прибора УПКИ – 01 и его расположение в корпусе пускателя изображены на рисунке 2.33.

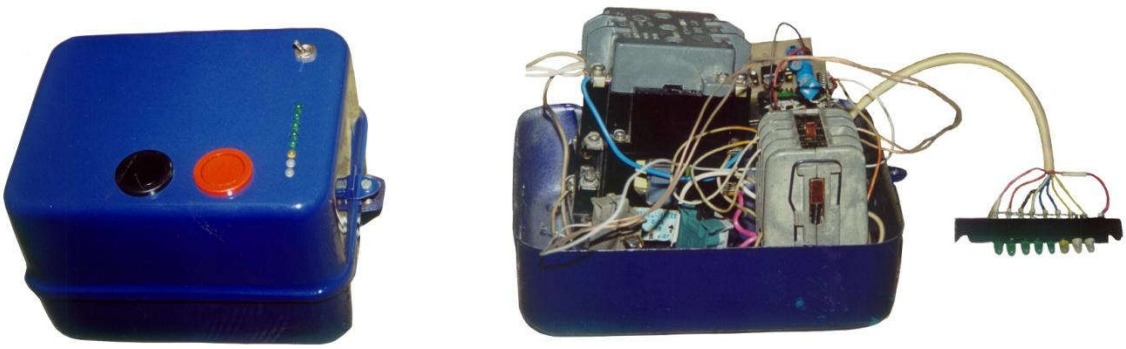


Рисунок 2.33 – Внешний вид и расположение прибора УПКИ – 01
в корпусе пускателя

Прибор УПКИ – 01 прост в эксплуатации и не требует специальных знаний и навыков от обслуживающего персонала. Простота обеспечивается тем, что прибор не производит измерений абсолютных значений каких-либо параметров, а оценивает действительное состояние изоляции относительно первоначального. Принцип работы прибора заключается в регистрации волновых затухающих колебаний в обмотке электродвигателя во время диагностики. При этом задача блокировочного устройства, являющегося одним из элементов диагностического прибора – исключить возможность пуска двигателя при неудовлетворительном состоянии изоляции, выявленном в ходе диагностики. Эта функция может быть отключена по желанию пользователя.

Прибор работает в автоматическом режиме, т. е. при включении двигателя отключается, а при отключении – включается. При ухудшении состояния изоляции обмотки свечение индикаторов будет плавно смещаться в сторону красных светодиодов.

2.5.3 Экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров изоляции на параметры схемы замещения двигателей

2.5.3.1 Зависимость электрических параметров обмоток электродвигателей от мощности и числа полюсов ЭД

Основной целью экспериментов по определению электрических параметров обмоток явилась необходимость оценки точности построенных теоретических моделей, позволяющих рассчитывать параметры межвитковой и корпусной изоляции [273].

Произвести измерение межвитковой емкости $C_в$ и межвиткового сопротивления $R_в$, в отличие от других параметров, в реальной обмотке статора практически невозможно. Поэтому с учетом рекомендаций, приведенных в ГОСТ 14950-75, разработаны макеты обмоток высокой степени адекватности, использование которых позволило получить требуемую информацию. Измерения параметров макетов производились после их пропитки и разреза в поперечном сечении. Пропитка макетов осуществлялась на электротермовакуумной установке, описанной в третьем разделе монографии.

Значения межвитковой емкости, емкости обмотки относительно корпуса определялись при помощи измерителей индуктивности и емкости Е7-11, Е7-9 и цифрового измерителя RLC-814 (рисунок 2.34). Сопротивление изоляции обмотки относительно корпуса и межвитковое сопротивление измерялись при помощи мегаомметра М4100/4 и цифрового измерителя сопротивления изоляции 1851 IN (рисунок 2.35).

Электрические параметры межвитковой изоляции макетов измерялись между соседними проводниками попарно, а обработка информации, осуществлявшаяся с использованием стандартных пакетов прикладных программ MS

Excel и MathCad, и последующее ее сравнение с результатами теоретических исследований выявило их хорошую сходимость: коэффициент корреляции между ними составил 0,92.

Рисунок 2.34 – Измерители E7-11, E7-9, RLC-814

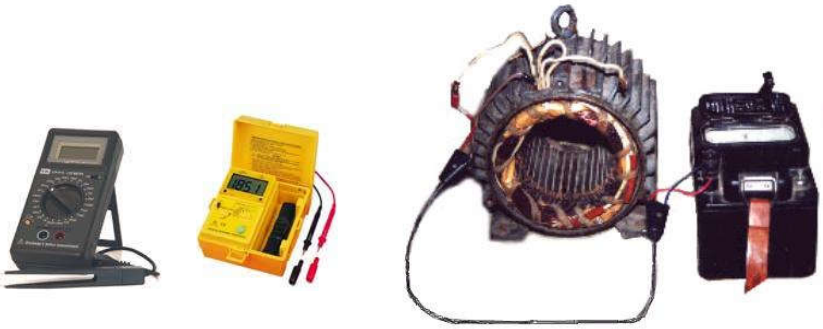


Рисунок 2.35 – Измерители сопротивления изоляции 1851 IN и M4100/4

На рисунке 2.36 представлена зависимость межвитковой емкости от мощности и числа полюсов, где увеличение значений $C_в$ с ростом мощности ЭД объясняется изменением конструктивных параметров двигателя, таких как диаметр провода, расстояние между витками и др. Кроме того, рост $C_в$ у двигателей с числом полюсов $2p$=6 меньше, чем у других ЭД из-за меньших диаметра провода и средней длины витка.

В свою очередь, значения емкости обмотки относительно корпуса с ростом мощности ЭД увеличиваются, т. к. увеличиваются диаметр провода и средняя длина витка, от которых прямо зависит площадь поверхности эквивалентного проводника.

Изменение значений межвиткового сопротивления с ростом мощности двигателя, как показывает анализ графиков, представленных на рисунке 2.37, наблюдается в сторону уменьшения. Это связано с тем, что увеличивается площадь поверхности проводников, вследствие чего возникает рост тока утечки через изоляцию. В то же время анализируя графики изменения сопротивления изоляции относительно корпуса можно сделать вывод, что с ростом мощности ЭД до 3 – 5 кВт наблюдается увеличение $R_к$, после чего значения данного параметра постепенно снижаются.

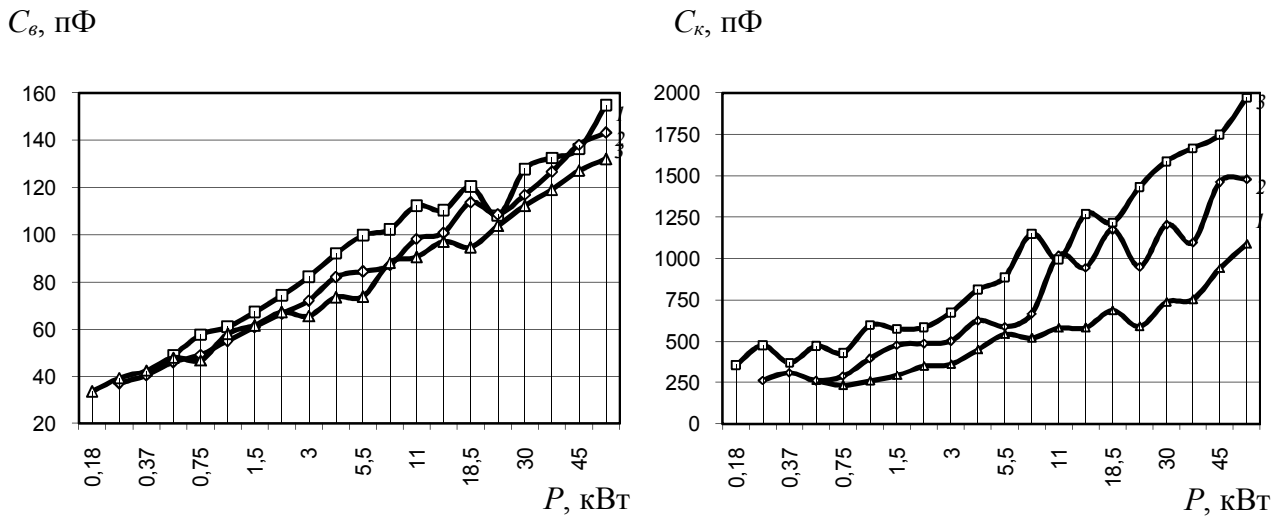


Рисунок 2.36 – Графики зависимости межвитковой емкости и емкости обмотки относительно корпуса от мощности и числа полюсов электродвигателей:
1 – 2р = 2; *2* – 2р = 4; *3* – 2р = 6

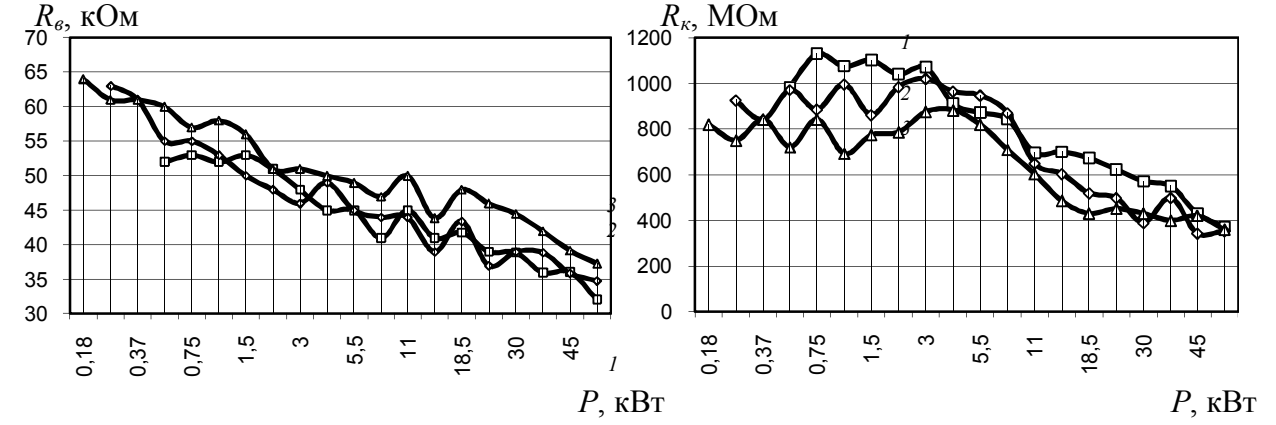


Рисунок 2.37 – Графики зависимости межвиткового сопротивления и сопротивления изоляции относительно корпуса от мощности ЭД и числа полюсов: *1* – 2р = 2; *2* – 2р = 4; *3* – 2р = 6

2.5.3.2 Зависимость обобщенного диагностического параметра от параметров конструкции двигателей

Одной из задач проведенных экспериментальных исследований являлось получение зависимости ОДП реальных электродвигателей от их конструктивных параметров [274]. Для ее решения была разработана программа проведения исследований, в соответствии с которой измерения ОДП проводились на двигателях серии 4А. Испытаниям подверглись ЭД, имеющие следующие параметры: высота вращения от 63 до 225 мм, числа полюсов – 2, 4, 6. Для измерений использовались приборы диагностики изоляции Омега ВП-05, Омега ЗК-01, генераторы импульсов Омега ГС-01, Г5-53 и универсальный двухлучевой осцил-

лограф С1-74 [295]. Значения параметров колебательного процесса с целью обеспечения репрезентативности выборки измерялись для двигателей одного типоразмера десятикратно.

Выполненные исследования показали высокую степень сходимости теоретических и экспериментальных значений ОДП. Теоретическая зависимость согласуется с экспериментальными данными с коэффициентом корреляции 0,88.

Графики зависимости величины Ψ от мощности двигателей при различных числах полюсов представлены на рисунке 2.38 [295, 313]. Сравнение данных графических зависимостей позволяет прийти к выводу, что чем больше число полюсов у ЭД, тем больше значение ОДП. Это можно объяснить увеличением количества проводникового материала при увеличении количества полюсов. На рисунке 2.39 даны в сравнении значения ОДП, полученные теоретическим и экспериментальным путем.

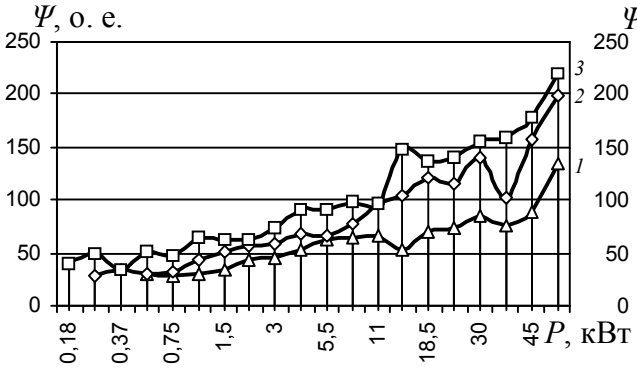


Рисунок 2.38 – Графики зависимостей Ψ от мощности ЭД и числа пар полюсов:
1 – 2р = 2; *2* – 2р = 4; *3* – 2р = 6

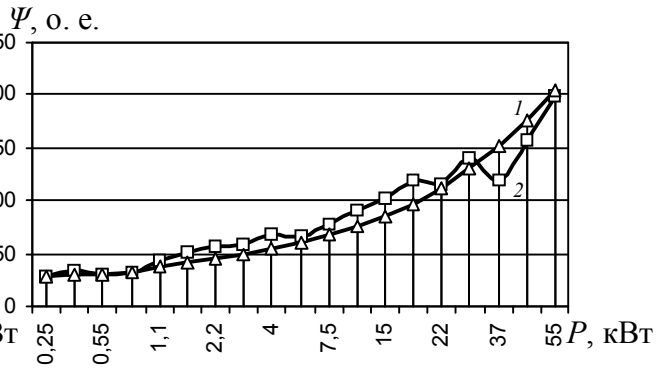


Рисунок 2.39 – Графики теоретических (*1*) и экспериментальных (*2*) зависимостей Ψ от мощности ЭД с числом полюсов $2p = 4$

2.6 Выбор и обоснование показателей эффективности технологических процессов пропитки и сушки изоляции электрических двигателей

Практика показывает, что показатели эффективности, как правило, бывают трех видов: технико-технологические (физические, механические, физико-химические характеристики продукта), технико-экономические (производительность, надежность, к. п. д., долговечность), экономические (прибыль, себестоимость, рентабельность) и прочие (психологические, статистические и эстетические) [314]. Применительно к технологиям пропитки и сушки изоляции электродвигателей наиболее приемлемым будет использование технико-технологических характеристик (состояние изоляции ЭД,

время достижения заданных значений параметров) и экономических показателей.

Поскольку технологический процесс ремонта электрических двигателей состоит из нескольких этапов, оценку качества целесообразно проводить как по отдельным этапам, так и по всему процессу. Связано это с тем, что часто необходимо знать получаемое качество для сравнения нескольких единичных технологий поэтапно, а также для проведения локальной оптимизации как параметров используемых методов (выбора наилучшего метода), так и режимов работы технологической установки.

В процессе выполнения технологических операций ремонта ЭД измеряются некоторые величины, которые называются частными показателями качества. Каждый из этих показателей является характеристикой успешности выполняемых операций.

Введем обозначения для различения показателей качества, характеризующих этапы технологического процесса. Первому этапу (разрушение связующего) присвоим индекс I, второму (обмоточно-изолировочные работы) – II, третьему (сушка до пропитки) – III, четвертому (пропитка) – IV, пятому (сушка после пропитки) – V.

В силу того, что на разных этапах реализации технологии ремонта используются различные физические процессы, то и частные показатели качества будут присущи только конкретному этапу либо комбинации этапов. Для того, чтобы выбрать некоторый единый (обобщающий) показатель качества изоляции, необходимо проанализировать изменяющиеся параметры электроизоляционной системы обмоток [315].

В рассмотренной схеме замещения $R_{об}$ и $L_{об}$ являются неизменяемыми. Они зависят от конструктивных особенностей и на протяжении всего жизненного цикла не могут быть изменены без проведения капитального ремонта. Параметры электроизоляционной системы $R_в$, $C_в$, $R_к$ и $C_к$ изменяются на протяжении срока службы, что подтверждают результаты анализа ряда работ [6, 37, 90, 282]. Отметим, что неэлектрические показатели качества изоляции могут быть связаны функциональной зависимостью с параметрами схемы замещения. При этом будет иметь место выражение

$$\Omega = f(R_к, C_к, R_в, C_в), \tag{2.84}$$

где Ω – неэлектрический показатель качества [1].

Как было указано выше, непосредственно в двигателе могут быть измерены только параметры изоляции обмотки относительно корпуса $R_к$ и $C_к$. Следовательно, необходимо найти такой параметр, который был бы связан зависимостью со значениями параметров схемы замещения обмотки. Им является обобщенный диагностический параметр Ψ, а также предложенный автором набор диагностических параметров, расширяющих область эффективного использования [90, 119, 272].

Можно заметить, что математический аппарат, касающийся обобщенного диагностического параметра Ψ, сравнительно прост. Это связано с рядом обстоятельств. Во-первых, значение ОДП может быть измерено на любом этапе технологического процесса восстановления изоляции обмотки статора электродвигателя. Во-вторых, сам параметр Ψ один, в связи с чем нет необходимости производить математические операции для получения суммарных показателей качества. В-третьих, обобщенный диагностический параметр заменяет целый набор частных показателей качества, которые характеризуют качество лишь косвенно. Несмотря на то, что сам по себе параметр Ψ также несет косвенную информацию, она более полно отражает реальное состояние изоляции обмотки в момент измерения. В-четвертых, весь процесс сравнения заключается в сопоставлении значений диагностического параметра, например, при использовании стратегии максимизации качества лучшим будет считаться вариант, у которого значение Ψ будет больше [215].

Таким образом, обобщенный диагностический параметр Ψ наиболее подходит для оценки качества в процессе восстановления изоляции, и можно с уверенностью говорить о целесообразности его широкого применения в будущем [217].

Как было ранее отмечено, значения обобщенного диагностического параметра, получаемые из выражений (2.43) и (2.44), будут присущи лишь конкретной марке ЭД. Это объясняется изменением параметров схемы замещения, таких как индуктивность $L_{об}$ и сопротивление $R_{об}$ обмотки, при изменении конструктивных параметров электродвигателя. Данное обстоятельство вызывает неудобство при оценке состояния изоляции в процессе эксплуатации, когда необходимо спрогнозировать остаточный ресурс двигателя. Однако такая характеристика оказывается полезной для оценки качества ремонта. Тогда показатель, который можно назвать генеральным обобщенным диагностическим параметром $\Psi_{\text{отн}}$, может быть найден с помощью естественного нормирования по выражению [316]

$$Щ_{\text{отн}} = \frac{Щ_i}{Щ_{i.\max}}, \tag{2.85}$$

где i – номер марки электродвигателя.

Анализ изменения обобщенного диагностического параметра при протекании процессов восстановления изоляции обмотки статора электрической машины позволил установить, что его значения отражают степень получаемого качества с момента начала процесса, т. е. диагностический параметр после четвертого этапа будет характеризовать как пропитку, так и совокупность сушки до пропитки и пропитки

$$\Psi_{\text{III+IV}} = \Psi_{\text{IV}}. \tag{2.86}$$

В случае, когда возникает необходимость точно установить вклад каждого этапа в качество ТОиР, можно использовать разность двух диагностических параметров, называемую разностным диагностическим параметром $Д\Psi$. Однако применение данного показателя затруднено, поскольку при разных значениях двух диагностических параметров в начале и конце процесса и одинаковых разностных диагностических параметрах одного и того же этапа получаемое качество изоляции (эффективность технологии) будет различным [317]. В данном случае, сравнивать получаемое качество можно, например, при одинаковых значениях диагностического параметра до начала осуществления того или иного этапа технологии либо при одинаковом конечном качестве. Во всех других случаях проводить сравнение невозможно [217, 316].

Решить проблему позволяет использование нормированного разностного диагностического параметра $\overline{\Psi}$, который находится как отношение разностного диагностического параметра $Д\Psi$ к строго оговоренному значению обобщенного диагностического параметра. В данном случае это может быть значение $\Psi_{\max}$, если сравнивается вклад каждого из этапов в получаемое по окончании процесса качество

$$\overline{\Psi}_{ij} = \frac{\Delta\Psi_{ij}}{\Psi_{\max}}, \tag{2.87}$$

где i – номер технологии; j – показатель этапа или группы этапов.

Значение $\Psi_{\max}$ может быть получено при исследовании протекающего процесса и будет равно наибольшему значению Ψ, так чтобы все получающиеся значения нормированного разностного диагностического параметра были меньше 1.

При исследовании старения изоляции наиболее удобно использовать нормированный разностный диагностический параметр, определяемый выражением

$$\tilde{\Psi}_i = \frac{\Psi_i}{\Psi_{эт\,i}}. \tag{2.88}$$

При этом получаемый показатель выражен в относительных единицах, что служит благоприятным фактором для сравнения, поскольку критерий сравнимости в данном случае ясно выражен.

Для того, чтобы исключить погрешности при определении нормированных разностных диагностических параметров, вызванных влиянием на их значения изменения температуры, введем в рассмотрение обобщенные разностные диагностические параметры:

$$\overline{\Psi}_{tij} = \frac{Д\Psi_{tij}}{\Psi_{t\max}}; \tag{2.89}$$

$$\widetilde{Ш}_{ti} = \frac{Ш_{ti}}{Ш_{эт\,ti}}. \qquad (2.90)$$

Таким образом, анализ альтернативных форм диагностического параметра Ψ позволил сделать вывод о том, что наиболее приемлемо использование в качестве технического критерия оптимизации нормированных разностных диагностических параметров. Введенные модификации обобщенного диагностического параметра и полученные выражения для их определения будут использованы в четвертом и пятом разделах настоящей монографии. Другими словами, помимо диагностики изоляции электродвигателей, предложенные диагностические параметры могут быть успешно использованы для оценки качества выполнения работ при ремонте и техническом обслуживании ЭД, а также при оптимизации параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей [215].

2.7 Основные результаты и выводы по разделу

1 Основными причинами недостаточного практического применения новейших методов диагностики при значительном росте разработок новых методов являются отсутствие на сельскохозяйственных предприятиях специалистов, способных правильно интерпретировать результаты диагностики, сложность и высокая стоимость диагностической аппаратуры. Рациональным путем решения названной проблемы является разработка метода комплексной диагностики, позволяющего наиболее точно и всесторонне оценить фактическое состояние электродвигателя при наименьших затратах как на этапе эксплуатации, так и ремонта.

2 Характер внешнего магнитного поля электрических двигателей в значительной мере определяется различного рода несимметриями обмоток и магнитной системы. В первую очередь, это относится к многополюсным машинам, собственное магнитное поле которых имеет мультипольный характер, зависящий от числа полюсов. Возникающие при развитии дефектов несимметрии нарушают этот мультипольный характер внешнего магнитного поля, вызывая спектр пространственных гармоник напряженности.

3 Наличие статического эксцентриситета ротора приводит к появлению во внешнем магнитном поле многополюсных электрических двигателей пространственных гармоник, порядок которых ниже и выше порядка основной гармоники. Наибольшее влияние статический эксцентриситет оказывает на уровень внешнего магнитного поля четырехполюсных электродвигателей: наличие дипольной составляющей напряженности ВМП и ее изменение в процессе эксплуатации может служить диагностическим признаком выработки подшипников. В свою очередь, наличие во ВМП ЭД гармоник кратных трем является диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора.

4 Построенная математическая модель ВМП отражает зависимость между параметрами конструкции электродвигателя и напряженностью его внешнего магнитного поля, и позволяет оперировать каждой гармоникой поля в отдельности. Предложенный коэффициент гармоник дает возможность при диагностике путем сравнения результатов измерений определять наличие дефекта, а также степень его развития.

5 Разработанный метод диагностики электрических двигателей на основе связи процессов развития дефектов в ЭД со спектром их ВМП обеспечивает измерение предложенного диагностического параметра для определения дефектов электродвигателя с необходимой для оценки их характера точностью. Разработанный метод диагностики требует небольшого числа операций и характеризуется высокой достоверностью получаемой информации, наглядностью и простотой реализации.

6 Созданная математическая модель волновых затухающих колебаний в обмотке с учетом параметров конструкции электроизоляционной системы ЭД позволила установить связь между параметрами ВЗК и схемы замещения двигателя. Доказано, что величина диэлектрической проницаемости ЭИС прямо пропорциональна диэлектрическим проницаемостям входящих в ее состав компонентов, а межвитковая емкость обратно пропорциональна коэффициенту пористости обмотки и зависит от свойств вещества, заполняющего поры.

7 Выявленные тенденция увеличения значений обобщенного диагностического параметра с ростом мощности ЭД и увеличением числа полюсов, а также негативное влияние внешних факторов, таких как концентрации влаги и химически агрессивных веществ в изоляции, на изменение значений ОДП дали возможность производить объективную оценку состояния различных типов двигателей, находящихся в условиях агропромышленного производства. Проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил адекватность разработанных математических моделей, связывающих значения конструктивных параметров изоляции и параметров схемы замещения электродвигателей. Коэффициент корреляции между соответствующими значениями, полученными теоретически и экспериментально, составил 0,92.

8 Построенная модель волнового затухающего процесса позволяет определять значения обобщенного диагностического параметра для эталонного состояния изоляции двигателей. Коэффициент корреляции между значениями Ψ, полученными теоретически и экспериментально, составил 0,88. Помимо диагностики изоляции электродвигателей, предложенные диагностические параметры успешно могут быть использованы для оценки качества выполнения работ по пропитке и сушке изоляции при ремонте и техническом обслуживании ЭД, а также при оптимизации параметров технологического процесса восстановления изоляции двигателей.

9 Созданные приборы диагностики изоляции обмоток электродвигателей просты в схемных решениях, малогабаритны, удобны в эксплуатации, снабжены автономным питанием, имеют современную элементную базу и характеризуются малым электропотреблением. Разработанные устройства автоматической диагностики могут выполняться встроенными в пускозащитную аппаратуру и позволяют не только определять техническое состояние изоляции ЭД без непосредственного участия человека, но и осуществлять прогнозирование ее остаточного срока службы.

10 Предложенная структура системы сбора диагностической информации дает возможность оперативно получать и обрабатывать данную информацию, на основе чего осуществляется своевременная оценка и прогнозирование технического состояния обмоток электродвигателей, вырабатываются рекомендации по комплексу организационно-технических мероприятий и, как следствие, увеличивается эффективность функционирования системы повышения их надежности в сельском хозяйстве.

3 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗОЛЯЦИИ

3.1 Теоретические исследования процессов переноса энергии и массы вещества, протекающих в твердых капиллярно-пористых телах, и обоснование принципов их интенсификации

Теоретические исследования процессов тепломассопереноса в обмотках электрических двигателей построены на применении системной методологии к анализу процессов переноса энергии и массы вещества, протекающих в твердых капиллярно-пористых телах. Применение системного анализа при исследовании столь сложного явления, как процессы тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах, а также столь сложного объекта, как электродвигатель обусловлено необходимостью сохранения понимания целого и главного при выделении и исследовании любого положения теории тепломассопереноса, а также любой конструктивной части ЭД.

Как уже отмечалось, существующие на сегодняшний день методы восстановления электрической изоляции, в частности разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток электродвигателей, а также нанесения изоляционных покрытий, не в полной мере реализуют основные положения теории тепломассопереноса [58, 68] и, как следствие, характеризуются недостаточными эффективностью и качеством выполнения технологических операций обслуживания и ремонта ЭД, обусловливающими такие показатели надежности двигателей, как вероятность безотказной работы и среднее время восстановления. Существенно интенсифицировать теплоэнергетические процессы в обмотках электрических двигателей и значительно повысить качество восстановления изоляции позволяет использование различных режимов вакуумирования, теоретическое обоснование эффективности которых приводится далее [318].

Таким образом, при изучении физико-химических явлений и процессов, протекающих в электроизоляционных материалах и элементах конструкции электрических двигателей при ремонте статорных обмоток, с целью повышения его эффективности и качества особое место необходимо отвести процессам переноса энергии и массы вещества, являющимся одним из важнейших предметов исследования в современной науке и имеющим большое практическое значение в стационарной и промышленной энергетике в связи с переходом на высокие режимные параметры ремонта ЭД.

Для дальнейших рассуждений важно отметить, что законы, управляющие процессами тепломассообмена в различных областях техники, одни и те же, а закономерности, полученные в одной области, могут быть с успехом использованы и в другой. Более того, характерной особенностью развития техники в на-

стоящее время является перенесение методов и конструктивных решений из одной отрасли промышленности или сельского хозяйства в другую. Данное обстоятельство, в числе прочих, дает возможность коренным образом изменить технологический процесс воспроизводства изоляционных систем и ремонта элементов конструкции электродвигателей [319].

Научной основой многих теплоэнергетических процессов является теория тепло- и массопереноса, включающая в себя комплекс научных знаний из гидродинамики сплошных сред, молекулярной физики, термодинамики и физикохимии дисперсных сред. Молекулярно-кинетическая теория явлений тепломассопереноса очень сложна и разработана недостаточно, поэтому современная теория тепло- и массообмена в основном является феноменологической, базирующейся на гидродинамике и термодинамике сплошных сред. В последнее время, благодаря работам нидерландских и бельгийских физиков, главным образом Де Гроота, активно развивается метод феноменологического исследования явлений переноса, называемый термодинамикой необратимых процессов, или термодинамикой неравновесных состояний [320]. Данный метод позволяет изучить перенос тепла и массы вещества в их неразрывной связи и охватывает гидродинамику вязких жидкостей, теплопроводность, диффузию и внутреннее трение. В результате вместо дифференциальных уравнений движения Навье – Стокса, переноса тепла Фурье – Кирхгофа, диффузии Фика может быть получена система дифференциальных взаимосвязанных уравнений переноса массы и энергии [321 – 323].

Решение указанной системы дифференциальных уравнений представляет значительные математические трудности, поэтому в большинстве случаев применяются численные методы решения с использованием вычислительных устройств. Однако получаемые решения представляют несомненный интерес не только для расчета процессов тепло- и массопереноса, но и для изучения основных закономерностей тепло- и массообмена, в частности, для разработки новых методов разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток статоров ЭД [324].

В свою очередь, отсутствие всестороннего анализа факторов, оказывающих влияние на эффективность протекания процессов пропитки и сушки, а также разобщенность выполняемых в рассматриваемой области исследований не позволяют сколько-нибудь существенно интенсифицировать указанные процессы. А отсутствие строго обоснованной теории пропитки и сушки статорных обмоток с точки зрения существующих законов тепло- и массопереноса в изоляции электрических двигателей подчеркивает сложность и актуальность решаемых в данной работе задач (рисунок 3.1).

Рисунок 3.1 – Система исследования процессов тепломассопереноса в обмотках

Кроме того, как уже указывалось в первом разделе монографии, полученные к настоящему времени результаты многочисленных исследований и их последующий системный анализ позволили из комплекса основных задач повышения эксплуатационной надежности электрооборудования на стадии его технического обслуживания и ремонта выделить задачу количественной оценки степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции обмоток статора электродвигателя на протяжении всего его жизненного цикла, начиная с момента ввода в эксплуатацию и заканчивая списанием, как основы для принятия решений, направленных на повышение эффективности протекания процессов пропитки и сушки названного вида ЭО [184].

Данная количественная оценка позволяет не только оптимизировать сроки, объем, продолжительность и режимные параметры технологических мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту электрических двигателей с учетом условий эксплуатации, но и осуществить прогноз наработки до очередной диагностики ЭД с высокой степенью достоверности, а также определить возможные пути дальнейшего повышения надежности электродвигателей.

Для решения задачи количественной оценки степени влияния как отрицательно, так и положительно воздействующих факторов на наработку до очередного контроля состояния двигателя необходимо реализовать следующие основные этапы:

- выявление всех воздействующих на изоляцию ЭД факторов в реальных условиях эксплуатации и ремонта, а также обоснованное сокращение их перечня;
- создание базы априорных значений;
- разработка методик обработки информации и количественной оценки степени влияния воздействующих факторов на наработку до очередной диагностики электродвигателя [189].

При реализации первого и второго этапов решения рассматриваемой задачи, часть результатов которых представлена в первом разделе данной работы, выявлена проблема, заключающаяся в полном отсутствии на сельскохозяйственных предприятиях учета аварий двигателей и анализа причин их возникновения. В большинстве случаев ведется лишь количественный учет вышедших из строя электродвигателей, зачастую без указания характера поломки.

Вследствие этого значительная часть результатов выполненных исследований основывалась на экспертной оценке энергетиков названных предприятий. Тем не менее полученный объем информации с различных сельскохозяйственных предприятий Алтайского края и других регионов Российской Федерации позволил сформировать базу данных по следующим эксплуатационным параметрам: температуре и влажности окружающей среды, наличию примесей в производственных помещениях, числу пусков электродвигателей, режиму работы, времени работы в течение суток, а также времени безотказной работы (в часах) ЭД.

Выполнение третьего этапа заключалось в проведении анализа полученной информации. При этом были рассмотрены три различных варианта метода исследования: дисперсионный, регрессионный и информационно-логический анализы, а также взвешены положительные и отрицательные стороны каждого. Наилучшие результаты показал информационно-логический анализ, что связано со следующими причинами:

- собранная выборка данных в силу указанных выше причин не является представительной, что не позволяет достичь достоверного результата при использовании дисперсионного и регрессионного анализов;
- данные собирались с большой степенью разнообразия, что категорически противоречит применению регрессионных методов статистической оценки;
- информационно-логический анализ позволяет создать на своей базе самообучающуюся систему, а дальнейшее пополнение базы данных приведет к повышению точности результатов, но не их опровержению.

Тогда, в первую очередь с использованием информационно-логического анализа и разработанной на его базе математической модели черного ящика, описывающей переход от нормального состояния работы ЭД к аварийному, были количественно определены все факторы, отрицательно влияющие на наработку до очередной диагностики электрического двигателя как в процессе его эксплуатации, так и ремонта. При этом процесс перехода состояния электродвигателя от нормального к аварийному рассматривался как стохастический [325].

Следующий шаг исследования – выявление факторов, замедляющих ход процессов старения электрической изоляции, связанных с эффективностью выполнения мероприятий по повышению эксплуатационной надежности ЭД в ходе технического обслуживания и ремонта его обмоток, а именно технологических операций по их пропитке и сушке, а также количественная оценка степени влияния данных факторов [326].

3.1.1 Анализ факторов, влияющих на качество восстановленной изоляции обмоток двигателей в ходе обслуживания и ремонта

При системном исследовании процессов тепломассопереноса в теле обмотки электрических двигателей необходимо знать физико-химическую структуру как самой обмотки, так и изоляционных материалов, являющихся неотъемлемой ее частью [319].

Рассмотрим тело обмотки статора двигателя при его капитальном ремонте. Очевидно, что обмотку ЭД до пропитки можно считать пористым телом, состоящим из капилляров или узких каналов, которые расположены по длине статорного паза прямолинейно. Сечение таких капилляров есть криволинейный треугольник.

Между атомами и молекулами изоляционных материалов ЭД как поступающих в ремонт, так и после их пропитки и сушки также имеются незаполненные веществами пространства. Ими могут быть макроскопические ($> 10^{-2}$ см) и микроскопические ($10^{-2} – 10^{-5}$ см) трещины, поры или каналы, субмикроскопические ($10^{-5} – 10^{-7}$ см) капилляры и полости, междумицеллярные и внутримицеллярные зазоры.

Как известно, пористое тело характеризуется рядом параметров: пористостью, проницаемостью и др. Под пористостью обмотки статора электродвигателя понимается отношение объема пор $V_{пор}$ к объему тела обмотки $V_{тел}$. В нашем случае объемная пористость $П_V$ равна поверхностной пористости $П_S$, которая определяется отношением поверхности пор к общей поверхности тела обмотки статора [112, 327].

В свою очередь пористость изоляционных покрытий разделяется на явную и скрытую. Первая связана с наличием открытых пор и легко обнаруживается обычными методами измерения сплошности. Скрытая (или неявная) пористость обусловлена замкнутыми порами; это слабые дефектные места пленки, обычно быстро проявляющиеся при эксплуатации ЭД.

Механическая пористость любых покрытий уменьшается с увеличением их толщины и ростом числа наносимых слоев. Для каждого покрытия в зависимости от материала, вида подложки, способа нанесения и других факторов существует минимальная толщина беспористых покрытий $\delta_{\min}$. Она весьма мала (составляет доли или единицы микрометров) при получении покрытий из газовой фазы и гораздо больше (достигает десятков и сотен микрометров) при получении их из жидких сред.

В соответствии с пористостью изменяется и проницаемость твердых капиллярно-пористых тел, каковыми являются обмотки электрических двигателей как эксплуатируемых в неблагоприятных условиях агропромышленного комплекса, так и подверженных комплексу мероприятий по их обслуживанию и ремонту.

Проницаемость – это свойство пористого материала, характеризующее его способность пропускать через себя жидкость или газ при наличии градиента давления и представляющее собой проводимость материала по отношению к жидкости или газу.

Проницаемость среды в виде связки тонких трубок, являющихся физической моделью статорных обмоток ЭД, определяется по формуле [328, 329]

$$K_f = \frac{k_{\text{г}} \cdot \Pi^3}{S_V^2}, \tag{3.1}$$

где $k_{\text{г}}$ – безразмерная постоянная, зависящая только от геометрической формы поперечного сечения трубок; S_V – полная поверхность капилляров в единице объема тела; Π – пористость материала.

В обеспечении защитных свойств изоляционных материалов проницаемость имеет большое практическое значение. Она служит показателем, определяемым как свойствами материала изоляции и внешней контактирующей с ней среды, так и результатом их взаимодействия – интенсивностью старения витковой и корпусной изоляции, а также характеризует комплекс изолирующих свойств связующего обмоток, его способность препятствовать проникновению жидкостей, паров и газов внутрь статорной обмотки из окружающей среды. С другой стороны, проницаемость обмотки двигателя до пропитки и сушки является одним из важнейших показателей, имеющим принципиальное значение при выборе параметров технологических процессов восстановления изоляции ЭД.

Согласно современным представлениям, проникновение вещества через твердое капиллярно-пористое тело складывается из адсорбции (растворения), диффузии, десорбции с другой стороны тела. При этом обмотка статоров электродвигателей с развитой внутренней поверхностью может быть представлена как твердый адсорбент, а процесс проникновения жидкостей, паров и газов внутрь статорной обмотки может быть обусловлен как длительным простоем двигателей (что характерно для сельскохозяйственного производства), так и

применением ряда распространенных в агропромышленном комплексе технологий ремонта ЭД [328, 330].

Изучение процессов переноса вещества в капиллярно-пористом теле статорной обмотки позволило выделить одно из важнейших условий качественной пропитки обмоток электрических двигателей – обеспечение высокой степени смачивания внутренней и внешней поверхностей пропитываемого материала, т. к. в противном случае образование прочной адгезионной связи между пропиточным составом (адгезивом) и обмоткой (субстратом) будет практически невозможно. Следовательно, адгезия и смачивание, как правило, взаимосвязаны и соответствующим образом характеризуют межфазное взаимодействие, которое подчиняется закону Юнга [331 – 336]. Кроме того, на смачивание влияет адсорбция на поверхности пропитываемого материала, особенно в тех случаях, когда окружающей средой является газ, снижая поверхностное натяжение твердого тела на величину $\pi_{пв}$, называемую поверхностным давлением, зависящим от природы жидкости и твердого тела [337].

Тогда в состоянии термодинамического равновесия периметр смачивания граничит не с исходной поверхностью твердой подложки, а с поверхностью, на которой адсорбированы молекулы воды и воздуха [328]. Поэтому уравнение равновесного краевого угла с учетом адсорбции примет вид

$$\cos\theta = \frac{(\sigma_{1.3} - \pi_{пв}) - \sigma_{2.3}}{\sigma_{1.2}}, \qquad (3.2)$$

где θ – угол смачивания; $\sigma_{1.2}$ – поверхностное натяжение на границе газ – жидкость; $\sigma_{1.3}$ – поверхностное натяжение твердого тела относительно окружающего газа; $\sigma_{2.3}$ – поверхностное натяжение твердого тела относительно жидкости.

Таким образом, анализируя зависимость (3.2), нетрудно убедиться, что поверхностное давление увеличивает краевой угол, т. е. ухудшает процесс растекания пропитывающего состава по поверхности тела обмотки. Добиться улучшения смачиваемости можно уменьшением поверхностного натяжения поверхности смачивания $\sigma_{2.3}$ путем повышения температуры и разности давлений [331, 338 – 341].

То есть с повышением температуры пропитывающего состава и пропитываемой поверхности твердого тела можно добиться улучшения смачиваемости и, как следствие, качества пропитки. Определение рациональных границ повышения температуры лака будет, в частности, зависеть от характера изменения его вязкости, а капиллярно-пористого тела обмотки – от класса нагревостойкости изоляции.

Наибольшего интереса в рамках рассматриваемой проблемы заслуживает задача установления связи между поверхностным натяжением $\sigma_{2.3}$ и разностью давлений Δp в двух граничных фазах – адгезиве и субстрате. При этом реальная электроизоляционная система рассматривается упрощенно,

например, путем введения понятия об эквивалентном радиусе капилляров, принятия капилляров сквозными и т. д. В результате изучения процесса проникновения жидкости в узкий канал в пучке проводников радиусом r, было получено следующее соотношение

$$Дp = \frac{2\sigma_{2.3}}{r}\cos\theta . \qquad (3.3)$$

Анализируя соотношение (3.3), можно сделать вывод о том, что даже не смачивающие поверхность твердого тела жидкости могут проникать в поры, каналы и капилляры тела обмотки под действием некоторого градиента давления, создание которого возможно не только за счет избыточного давления, но и, как будет показано далее, за счет вакуума определенной глубины.

Тем не менее сама по себе данная возможность еще не означает получения прочной адгезионной связи. Поэтому, возвращаясь к вопросу о связи смачиваемости с адгезией, найдем зависимость критерия смачивания $\cos\theta$ от работы адгезии $W_а = \sigma_{1.3} + \sigma_{1.2} - \sigma_{2.3}$ и работы когезии $W_к = 2\sigma_{1.2}$, носящую название закона Дюпре

$$\cos\theta = \frac{2W_а - W_к}{W_к} . \qquad (3.4)$$

То есть в соответствии с законами Юнга (3.2) и Дюпре (3.4) большей разности между работой адгезии и когезии соответствует лучшая смачиваемость пропитывающим составом поверхности проводников обмотки.

Поскольку смачивание связано с адсорбцией паров воды и воздуха на поверхности твердого тела, значение определяемой работы адгезии обычно меньше на величину $\pi_{пв}$ [342, 343]

$$W_а = \sigma_{1.2}(1 + \cos\theta) - \pi_{пв}, \qquad (3.5)$$

из чего можно сделать вывод о том, что чем выше влияние адсорбции на поверхностное натяжение пропитываемого материала, тем меньше величина работы адгезии, а, следовательно, тем хуже адгезионная связь между поверхностью тела обмотки и пропитывающим составом.

Обмотка электрических машин отличается «ажурной» внутренней структурой, включающей поры различного размера, и вид пор определяет особенности механизма переноса вещества в теле обмотки. При этом решающее влияние на адсорбционную способность и скорость поглощения оказывает содержание мелких пор в единице объема или массы адсорбента [344]. Исследование закономерностей формирования адгезионного контакта в реальных изоляционных системах показало, что термодинамические условия смачивания поверхности оказываются не всегда достаточными. Следует учитывать кинетику процессов

смачивания и растекания, изменение вязкости во время пропитки, а также микрорельеф поверхности проводников [331, 345].

Таким образом, из изложенного следует, что основными факторами, определяющими полноту контакта – заполнение неровностей и пор по поверхности подложки, являются вязкость, плотность и поверхностное натяжение лакокрасочного материала, а также размеры, форма и расположение пор на поверхности тела обмотки. При этом форма капилляра играет существенную роль, поскольку возможно возникновение таких условий, при которых перемещение фронта пропитывающего состава будет тормозиться защемленным в тупиковых порах воздухом [9].

Удаление молекул воды и воздуха из трещин, пор и капилляров позволяет увеличить смачиваемую поверхность. Как показали выполненные при непосредственном участии автора исследования, добиться этого можно путем вакуумирования, используя зависимость температуры кипения жидкости от величины и скорости изменения давления [1, 4, 58]. Интенсифицировать процесс капиллярной пропитки позволяет скоростное вакуумирование, физические основы которого будут рассмотрены далее.

3.1.2 Математическое описание процесса разрушения связующего обмоток электрических двигателей

Как известно, воздействие агрессивной среды производственных помещений агропромышленного комплекса в сочетании с характерными для сельского хозяйства режимами работы электродвигателей и низким качеством электрической энергии негативно отражается на структуре и свойствах изоляции обмоток ЭД – она интенсивно разрушается, что неизбежно приводит к преждевременному выходу двигателя из строя.

В то же время, как указывалось ранее, при выполнении капитального ремонта электродвигателей необходимо извлечение поврежденной статорной обмотки, что требует использования таких средств и методов разрушения связующего, которые обеспечивали бы максимальную эффективность данного технологического процесса при минимальном повреждении других конструктивных элементов ЭД.

Таким образом, задача теоретического исследования процессов разрушения связующего статорных обмоток под действием агрессивных сред имеет важное значение как для выработки мероприятий по снижению скорости старения электроизоляционных материалов в условиях эксплуатации, так и для разработки современных методик извлечения обмоток из статоров ЭД.

Химическая реакция между агрессивной средой и химически нестойкими связями полимера может происходить на границе раздела фаз и в объеме фазы полимера (в реакции участвуют растворенные в полимере компоненты растворителя). Считая обе фазы единой замкнутой системой, скорость химической реакции W можно выразить через dn/vdt, где n – число распавшихся связей в момент времени t, v – объем полимера [181, 346 – 349].

Полагая, что соблюдается закон действия масс, объем полимера в ходе процесса деструкции практически не изменяется и полимер изотропен, уравнение для скорости распада химически нестойких связей можно записать так

$$W = \frac{dC_n}{dt} = k(C_n^0 - C_n)C_{\text{кат}}C_{\text{раст}}, \tag{3.6}$$

где C_n^0 – начальная концентрация химически нестойких связей в полимере; C_n – концентрация распавшихся связей; $C_{\text{кат}}$ – концентрация катализатора в полимере; $C_{\text{раст}}$ – концентрация растворителя в полимере; k – константа скорости распада химически нестойких связей.

Концентрация катализатора в полимере, например кислоты или основания, может быть найдена из уравнения

$$\frac{dC_{\text{кат}}}{dt} = D_{\text{кат}}\nabla^2 C_{\text{кат}} - \sum_i C_{\text{кат}}C_i k_i, \tag{3.7}$$

где ∇ – оператор Лапласа; C_i – концентрация функциональных групп в полимере, способных вступать в реакцию комплексообразования или замещения катализатора; k_i – константы скорости реакций комплексообразования или замещения катализатора с функциональными группами полимера.

Если расходуется растворитель при распаде химически нестойких связей в полимере, в частности, расходование воды в реакциях гидролиза, то концентрация растворителя находится из уравнения

$$\frac{\partial C_{\text{раст}}}{\partial t} = D_{\text{раст}}\nabla^2 C_{\text{раст}} - k(C_n^0 - C_n)C_{\text{кат}}C_{\text{раст}}. \tag{3.8}$$

Концентрация диффундирующих веществ на поверхности полимерного изделия определяется некоторым законом массопередачи

$$j = в(C_{\text{пов}} - C_{\text{р}}), \tag{3.9}$$

где j – поток диффундирующего вещества; β – коэффициент массопередачи; $C_{\text{пов}}$ и $C_{\text{р}}$ – концентрации вещества на поверхности и в объеме раствора соответственно.

Значения коэффициента диффузии $\overline{D}$ могут быть рассчитаны на основании данных по проницаемости и растворимости раствора в полимере по формуле

$$\overline{D} = \frac{g_{(C_{\text{р}})}l}{C^0 - C_{\text{р}}}\frac{V}{S}, \tag{3.10}$$

где V – объем полимерного изделия; S и l – площадь и толщина пленки полимера; C^0 и $C_р$ – концентрации раствора в поверхностном слое полимера со стороны раствора постоянной концентрации и измеряемого раствора соответственно; $g_{(C_р)} = \lim \frac{dC_р}{dt}$.

Большую часть полимерных изделий можно в первом приближении представить как простые геометрические тела. Моделью полимерных пленок и покрытий является параллелепипед, нитей – цилиндр.

Химическая деструкция может происходить в трех областях: внешней диффузионно-кинетической, внутренней диффузионно-кинетической и внутренней кинетической [181, 346 – 349].

Рассмотрим, как изменяются молекулярная масса и масса полимерного изделия при протекании химической деструкции в этих областях.

Внутренняя диффузионно-кинетическая область. Совместное решение уравнений (3.6), (3.7) и (3.8) представляет собой достаточно сложную математическую задачу и решить ее возможно с помощью ЭВМ. При рассмотрении диффузии агрессивных сред в полимерах установлено, что диффузия катализатора (кислоты или основания) и растворителя происходит с одинаковой скоростью единым фронтом, а диффузия растворителя – со значительно большей скоростью, чем катализатора.

Первый вариант имеет место, как правило, при диффузии агрессивных сред в гидрофильных полимерах и при диффузии кислот и оснований с высоким давлением пара в гидрофобных полимерах. Второй вариант отмечается при диффузии кислот и оснований с низким давлением пара в гидрофобных полимерах. Указанные закономерности упрощают решение задачи, т. к. в первом случае диффузия катализатора и растворителя может быть охарактеризована одним коэффициентом диффузии $D_{кат} = \ = D_{раст}$. Во втором случае $D_{раст} >> D_{кат}$ и можно считать, что концентрация растворителя в реакционной зоне полимерного изделия после некоторого времени становится постоянной и равной его растворимости $C^0_{раст}$, т. е. $\partial C_{раст}/\partial t = 0$ при $C_{раст} = C^0_{раст}$.

Таким образом, задача упрощается и сводится к решению уравнений (3.6) и (3.7), из которых первое при учете соотношения $C_n^0 - C_n \approx C_n^0$ принимает вид

$$\frac{dC_n}{dt} = k_{эф} C_{кат}, \qquad (3.11)$$

где $k_{эф} = kC_n^0 \ C^0_{раст}$.

В уравнении (3.7) для простоты ограничимся одним слагаемым и положим $C = C_i$.

В зависимости от того, происходят или нет связывания катализатора с функциональными группами полимера, можно получить два уравнения для изменения количества разрывов макромолекул при деструкции.

$K_p \to \infty$, т. е. имеющиеся в полимере и образующиеся в ходе деструкции функциональные группы реагируют с катализатором практически необратимо. Учитывая, что эти реакции (например, протонирование или комплексообразование) протекают гораздо быстрее, чем реакции деструкции, уравнение (3.7) запишется так

$$\frac{\partial C_{\text{кат}}}{\partial t} = D_{\text{кат}} \nabla^2 C_{\text{кат}} - k_{\text{эф}} C_{\text{кат}} . \qquad (3.12)$$

Решение этого уравнения впервые было выполнено Данкверстом [346]. Для параллелепипеда, один из размеров которого намного меньше двух других при граничных условиях $C_{\text{кат}} = 0$ при $t = 0$ и $0 \le x \le l$, оно имеет вид

$$C_{\text{кат}}(x,t) = C^0_{\text{кат}} \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin b_m x}{(2m+1)(b_m^2 D_{\text{кат}} + 1)} \left[k_{\text{эф}} + b_m^2 D_{\text{кат}} \exp - (b_m^2 D_{\text{кат}} + k_{\text{эф}}) t \right] \right\}, \qquad (3.13)$$

где $b_m = \pi(2m+1)/l$; $C^0_{\text{кат}}$ – растворимость катализатора в полимере.

Подставляя уравнение (3.13) в (3.11) и производя двойное интегрирование от 0 до t и от 0 до $l/2$, получаем

$$C_n = k_{\text{эф}} C^0_{\text{кат}} t \times$$
$$\times \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{k_{\text{эф}} t (b_m^2 D_{\text{кат}} + k_{\text{эф}}) + b_m^2 D_{\text{кат}} [1 - \exp - (b_m^2 D_{\text{кат}} + k_{\text{эф}}) t]}{(2m+1) b_m (b_m^2 D_{\text{кат}} + k_{\text{эф}})^2 l t} \right\}. \qquad (3.14)$$

Анализ уравнения (3.12) показывает, что если $b_m^2 D_{\text{кат}} > k_{\text{эф}}$, достаточно ограничиться первым членом ряда. Подробное рассмотрение этого случая будет приведено ниже.

Решение уравнения (3.7) для цилиндра радиусом r, намного меньшим длины при граничных условиях $C_{\text{кат}} = C^0_{\text{кат}}$ при $x = r$ для $t > 0$ и начальном условии $C_{\text{кат}} = 0$ при $t = 0$ и $x \le r$, имеет вид

$$C_{\text{кат}}(x,t) = C^0_{\text{кат}} \left\{ \frac{1 - \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \left[k_{\text{эф}} + D_{\text{кат}} \frac{\mu_n^2}{r^2} \exp - \left(D_{\text{кат}} \frac{\mu_n^2}{r^2} + k_{\text{эф}} \right) t \right] j_0 \left(\frac{x}{r} \mu_n \right)}{\left(D_{\text{кат}} \frac{\mu_n^2}{r^2} + k_{\text{эф}} \right) \frac{\mu_n}{r} j_1 \mu_n} \right\}, \qquad (3.15)$$

где j_0 и j_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно; μ_n – корни функции Бесселя.

Выражение для C_n получается из уравнений (3.11) и (3.15) после интегрирования от 0 до t и от 0 до r

$$\mathrm{C}_n = k_{\text{эф}} \cdot C^0_{\text{кат}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_{\text{кат}}}{r^2 z} \left[t - \frac{1 - \exp(-zt)}{z} \right], \tag{3.16}$$

где $z = \dfrac{D_{\text{кат}}}{r^2} + k_{\text{эф}}$.

Для начального отрезка времени деструкции, если $\exp(-zt) > 0{,}9$, для расчетов можно воспользоваться приближенным уравнением

$$C_n \approx k_{\text{эф}} C^0_{\text{кат}} \left[\frac{8}{3\pi^{1/2}} \frac{D^{1/2}_{\text{кат}}}{r} t^{3/2} - \frac{D_{\text{кат}} t^2}{2r^2} - \frac{2}{15\pi^{1/2}} \frac{D^{1/2}_{\text{кат}}}{r} \left(\frac{D_{\text{кат}}}{r^2} + k_{\text{эф}} \right) t^{5/2} \right]. \tag{3.17}$$

Если $\exp(-zt) < 0{,}1$, то уравнение (3.16) имеет вид

$$\mathrm{C}_n \approx k_{\text{эф}} C^0_{\text{кат}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_{\text{кат}}}{zr^2} \left(t - \frac{l}{z} \right). \tag{3.18}$$

Если $D_{\text{кат}} \mu_n^2 / r^2 > k_{\text{эф}}$, то достаточно ограничиться первым членом ряда, что упрощает уравнения (3.16) и (3.18).

Продукты деструкции практически нерастворимы в агрессивной среде. За протеканием процесса деструкции можно следить, периодически извлекая полимерное изделие из агрессивной среды и удаляя продукты деструкции либо механическим путем, либо химическим (растворяя их в растворителе).

$K_p \to 0$, т. е. функциональные группы в полимерах в заметной степени не реагируют с катализатором. Уравнение (3.7) принимает вид диффузионного уравнения Фика.

Подставляя решение уравнения Фика для параллелепипеда в (3.11) и интегрируя в тех же пределах, что и уравнение (3.16), получаем

$$C_n = k_{\text{эф}} C^0_{\text{кат}} t \left\{ 1 - \frac{8}{p^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left[1 - \exp(2m+1)^2 y \right] \frac{1}{(2m+1)^4 y} \right\}, \tag{3.19}$$

где $y = p^2 D_{\text{кат}} t / l^2$.

Для $y < 1$ этот случай реализуется в начальный период деструкции для пленок любой толщины

$$C_n = k_{эф} C^0_{кат} t \frac{8}{p^2} Ш(y), \tag{3.20}$$

где $Ш(y) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\exp-(2m+1)^2 y - 1 + (2m+1)^2 y}{(2m+1)^4 y}$.

С помощью расчетов, проведенных на ЭВМ, установлена простая связь $\varphi(y) = 0{,}589\, y^{0,5}$, т. е.

$$C_n = \frac{4}{p^{1/2}} k_{эф} C^0_{кат} D^{1/2}_{кат} l^{-1} t^{3/2}. \tag{3.21}$$

Уравнение (3.21) удобно представить в следующем виде

$$n = \frac{8}{p^{1/2}} k_{эф} C^0_{кат} D^{1/2}_{кат} S t^{3/2}. \tag{3.22}$$

Таким образом, в начальный период деструкции число распавшихся связей зависит от константы скорости химической реакции, коэффициента диффузии, растворимости катализатора, поверхности пленки и времени.

Для цилиндра после аналогичных преобразований получается выражение

$$C_n = k_{эф} C^0_{кат} \left\{ t - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4r^2}{м_n^4 D_{кат}} \left[1 - \exp-\left(\frac{D_{кат}}{r^2} м_n^2 t \right) \right] \right\}. \tag{3.23}$$

При решении этого уравнения достаточно воспользоваться первым членом ряда.

Для начала деструкции при $\exp\left(-\frac{D_{кат}}{r^2} м_1^2 t \right) < 0{,}8$ можно использовать уравнение

$$C_n \approx k_{эф} C^0_{кат} \left[\frac{8}{3p^{1/2}} \frac{D^{1/2}_{кат}}{r} м_1^2 t^{3/2} - \frac{D_{кат} t^2}{2r^2} - \frac{2}{15p^{1/2}} \left(\frac{D^{1/2}_{кат}}{r^2} \right) t^{5/2} \right]. \tag{3.24}$$

Если $\exp\left(-\frac{D_{кат}}{r^2} м_1^2 t \right) \le 0{,}9$, то получается линейное уравнение

$$C_n \approx k_{эф} C^0_{кат} \left(t - \frac{4r^2}{м_1^4 D_{кат}} \right), \tag{3.25}$$

где отсекаемый отрезок на оси времени

$$t_0 \approx 4r^2 / \mu_1^4 D_{\text{кат}}, \tag{3.26}$$

а угловой коэффициент равен произведению $k_{\text{эф}} C_{\text{кат}}^0$.

Деструкция происходит в реакционной зоне, размеры которой увеличиваются и в предельном случае (внутренняя кинетическая область) становятся равными размерам полимерного изделия.

Внутренняя кинетическая область. Кинетическое уравнение для параллелепипеда может быть получено из уравнения (3.19) при $y >> 1$ и для цилиндра – из уравнения (3.23) при $\exp\left(-\frac{D_{\text{кат}}}{r^2} м_1^2 t\right)$ в обоих случаях

$$C_n = k_{\text{эф}} C_{\text{кат}}^0 t. \tag{3.27}$$

Таким образом, концентрация распавшихся связей при небольших степенях превращения пропорциональна концентрации катализатора в условиях насыщения.

Внешняя диффузионно-кинетическая область. При протекании деструкции во внешней диффузионно-кинетической области возможны два случая: продукты деструкции растворимы в агрессивной среде и продукты деструкции в агрессивной среде нерастворимы и накапливаются.

Тогда за протеканием процесса деструкции можно следить либо по убыли массы полимерного изделия, либо по накоплению продуктов деструкции.

Процесс деструкции в этой области протекает в некотором тонком реакционном поверхностном слое, размеры которого определить чаще всего не представляется возможным из-за отсутствия значений $k_{\text{эф}}$ и $D_{\text{кат}}$. Обычно принимают этот слой бесконечно малым, и деструкция происходит практически с поверхности полимерного изделия.

В таком случае

$$\frac{dn}{dt} = k_{\text{пов}} C_{n\,\text{пов}}\, C_{\text{кат(пов)}}\, C_{\text{раст(пов)}}\, S. \tag{3.28}$$

Индекс ‘пов’ показывает, что концентрации относятся к поверхности раздела полимер – агрессивная среда. При решении этого уравнения предполагается, что полимер ориентирован и макромолекулы расположены параллельно большей части поверхности раздела. Концентрация активных центров на поверхности $C_{n\,\text{пов}}$ в данном процессе зависит от типа распада макромоле-

кул, их упаковки, энергии когезии и растворимости продуктов распада (мономеров и олигомеров) в окружающей среде.

При таком типе деструкции на поверхности полимерного изделия за очень короткое время устанавливается стационарная концентрация активных центров, равная $C_{n\,\text{пов}} z^{-1}$ (где z – константа, зависящая от названных выше факторов). Например, если распад макромолекул происходит по закону концевых групп и образующиеся мономеры растворимы в агрессивной среде, то $C_{n\,\text{пов}} \approx 2C^0_{n\,\text{пов}} / P_{n0}$ и $k_{\text{пов}}$ является константой скорости деполимеризации. Если распад макромолекул происходит по закону случая с последующей быстрой одноактной деполимеризацией и продукты деструкции растворимы, то $C_{n\,\text{пов}} \approx C^0_{n\,\text{пов}}$ и $k_{\text{пов}}$ – константа скорости распада по закону случая.

При деструкции такого типа очень важно знать состояние растворов катализаторов на поверхности полимера, т. е. чему равны значения $C_{\text{кат(пов)}}$ и $C_{\text{раст(пов)}}$.

При контакте раствора электролита с твердым полимером электролит может находиться в растворе, полимере и на границе раздела фаз (раствор – полимер). Градиент концентраций и активностей, которые могут возникнуть на границе раздела фаз раствор – полимер, обусловлены протеканием деструкции, включающей диффузию электролита, продуктов реакции и химическую реакцию, нарушающей равновесие статического распределения электролита (молекул и ионов) у поверхности полимерного образца (концентрационный эффект), а также тем, что электролит и продукты полимерного образца (адсорбционный эффект).

Концентрационный эффект наиболее подробно рассмотрен Мак-Грегором и Петерсом [136, 350], которые установили связь толщины поверхностного слоя δ с диффузионными параметрами вещества в растворе и полимере. Ими было показано, что при больших скоростях перемешивания раствора $\delta \to 0$.

Таким образом, используя перемешивание раствора, можно свести концентрационный эффект к минимальному значению.

Адсорбционный эффект может быть оценен по уравнению Гиббса

$$\Gamma = -\frac{\alpha}{RT}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\alpha}\right)_m, \qquad (3.29)$$

где Г – относительная адсорбция; σ – поверхностное натяжение на границе полимер – раствор, определяемая из уравнения Юнга.

Водные растворы электролитов являются поверхностно-инактивными и величина Г – отрицательная. Расчеты, проведенные для гидрофобных полимеров, показывают, что величина Г мала и в большинстве случаев можно принять, что термодинамические параметры катализатора и растворителя в растворе и на границе раздела полимер – раствор будут близки.

Растворение полимеров. При контакте с агрессивными средами полимеры могут растворяться в них. Так, в концентрированных растворах серной кислоты растворяются многие гетероцепные полимеры. Процесс растворения начинается с образования поверхностного набухшего слоя. Связь между временем набухания $ф_{наб}$ и толщиной набухшего слоя $д$ описывается соотношением [42, 335]

$$ф_{наб} = \frac{д^2}{6\overline{D}} . \qquad (3.30)$$

После этого процесса растворение происходит в стационарном состоянии, и изменение массы полимера можно найти из уравнения

$$m = m_0 - вt , \qquad (3.31)$$

где $в = \frac{S\overline{D}c}{д}$ – коэффициент растворения (здесь S – поверхность полимерного изделия; c – плотность полимера), а величина $д$ зависит от характера течения растворителя и молекулярной массы полимера.

Влияние температуры. Температура оказывает большое влияние на протекание физических и химических процессов, приводящих к изменению эксплуатационных свойств полимерных изделий. Влияние температуры на константы скорости и равновесия удовлетворительно описывается уравнениями Аррениуса и Вант-Гоффа, однако эти уравнения правомерно использовать в определенном температурном интервале.

Константы скорости реакций раствора химически нестойких связей удовлетворительно описываются в температурном интервале менее 100 °С уравнением Аррениуса. При повышении температуры, в основном, увеличивается толщина набухшего поверхностного слоя, растворимого в агрессивных средах полимера

$$д = д_{осхр}\left(-\frac{ДН_{раст}}{RT}\right), \qquad (3.32)$$

а энтальпии растворения полимеров превышают 12,6 – 16,8 кДж/моль.

Таким образом, полученные зависимости позволяют качественно оценить степень воздействия агрессивных сред на изоляцию обмотки в условиях эксплуатации и ремонта и определить скорость ее старения, что создало предпосылки к отысканию показателей интенсификации процесса разрушения связующего в ходе ТОиР.

3.1.3 Повышение эффективности пропитки обмоток электродвигателей посредством интенсивного изменения давления

Рассматривая явления переноса энергии и вещества при пропитке и сушке обмоток электродвигателей, следует признать, что они подчиняются общим закономерностям термодинамики необратимых процессов. Исходя из общей теории систем и системного анализа, данные процессы можно объединить в одну систему, вследствие чего проявляется тесная внутренняя связь между абстрактной сложной вероятностной системой и ее физической реализацией. Для изучения такой физической системы ее заменяют абстрактной с теми же отношениями. Тогда задача становится чисто математической, причем такого рода аналогия имеет место и в динамическом случае, где физическая система представляется системой дифференциальных уравнений.

Аналитическая задача, устанавливающая связь между временными и пространственными изменениями потенциалов переноса при сушке влажных капиллярно-пористых материалов, формулируется на основе системы дифференциальных уравнений молярно-молекулярного тепломассопереноса, являющейся математической моделью процессов переноса при сушке. В соответствии с [98, 99, 329, 345, 351 – 353], а также с учетом результатов выполненных автором исследований по моделированию процессов переноса в случае постоянных коэффициентов эта система уравнений примет следующий вид [350, 354, 355]

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \delta \cdot \nabla^2 t + D \cdot \nabla^2 u + D \cdot \delta_p \cdot \nabla^2 p; \\ \dfrac{\partial t}{\partial \tau} = \left(a + \dfrac{\mathrm{E} \cdot r \cdot D \cdot \delta}{c} \right) \nabla^2 t + \dfrac{\mathrm{E} \cdot r}{c} D \cdot \nabla^2 u + \dfrac{\mathrm{E} \cdot r}{c} D \cdot \delta_p \cdot \nabla^2 p; \\ \dfrac{\partial p}{\partial \tau} = -\dfrac{\mathrm{E}}{c_{\text{в}}} D \cdot \delta \cdot \nabla^2 t - \dfrac{\mathrm{E}}{c_{\text{в}}} D \cdot \nabla^2 u + \left(a_p - \dfrac{\mathrm{E}}{c_{\text{в}}} D \cdot \delta_p \right) \nabla^2 p, \end{cases} \tag{3.33}$$

где δ – термоградиентный коэффициент переноса влаги; k_p – коэффициент фильтрационного переноса среды; r – удельная теплота фазового перехода; $c_{\text{в}}$ – удельная емкость влажного воздуха в теле обмотки статора; Е – критерий фазового перехода; $\delta_p = \dfrac{k_p}{D \cdot \rho_0}$ – относительный коэффициент фильтрационного потока парообразной влаги; $a_p = \dfrac{k_p}{c_{\text{в}} \cdot \rho_0}$ – коэффициент конвективной диффузии.

Указанный критерий E рассчитывается как отношение изменения концентрации влаги, вызванного фазовым переходом, к общему изменению концентрации влаги. Из определения следует: $0 \le \mathrm{E} \le 1$. Если перемещаемая влага является жидкостью, то $\mathrm{E} = 0$, если паром, то $\mathrm{E} = 1$.

При выводе данной системы уравнений (3.33) сделаны допущения: температура связанного вещества (влаги) равна температуре скелета тела; конвективный перенос – величина малая и ею можно пренебречь. Однако, к сожалению, решение этой, по существу, нелинейной системы уравнений наталкивается на значительные трудности, т. к. в литературе отсутствуют данные по целому ряду коэффициентов переноса.

В свою очередь, Ю. А. Михайлов [329] предложил упрощенные критериальные уравнения для описания и расчета высокоинтенсивного тепломассопереноса:

$$\overline{T} = \overline{T}\left(\mathrm{Lu}, \mathrm{Bi}_g, \mathrm{Ko}, \mathrm{Pn}, \mathrm{E}, \mathrm{Fo}\right); \tag{3.34}$$

$$\overline{U} = \overline{U}\left(\mathrm{Lu}, \mathrm{Bi}_m, \mathrm{Ko}, \mathrm{Pn}, \mathrm{E}, \mathrm{Fo}\right); \tag{3.35}$$

$$\overline{P} = \overline{P}\left(\mathrm{Lu}, \mathrm{Lu}_p, \mathrm{Bu}, \mathrm{Ko}, \mathrm{Pn}, \mathrm{E}, \mathrm{Fo}\right), \tag{3.36}$$

где

$$\overline{T} = \frac{\bar{t} - t_0}{t_c - t_0}; \tag{3.37}$$

$$\overline{U} = \frac{u_0 - \bar{u}}{u_0 - u_p}; \tag{3.38}$$

$$\overline{P} = \frac{p - p_0}{p_0} \tag{3.39}$$

соответственно безразмерные средние температура, потенциал массопереноса и давление.

В приведенные уравнения входят следующие критерии подобия:

$$\mathrm{Lu} = \frac{a_p}{D} \text{ – критерий Лыкова;} \tag{3.40}$$

$$\mathrm{Bi}_g = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} \text{ и } \mathrm{Bi}_m = \frac{\alpha_0 \cdot \ell}{\lambda_m} \text{ – тепловой и массообменный критерий Био;} \tag{3.41}$$

$$\mathrm{Ko} = \frac{r \cdot \text{Д}U}{c_{\text{в}} \cdot \text{Д}T} \text{ – критерий Коссовича;} \tag{3.42}$$

$$\mathrm{Pn} = \frac{\delta_p \cdot \text{Д}u}{\text{Д}p} \text{ – критерий Поснова;} \tag{3.43}$$

$$\mathrm{Bu} = \frac{r \cdot c_p \cdot \text{Д}p}{c \cdot \text{Д}T} \text{ – критерий Булыгина.} \tag{3.44}$$

Не смотря на то, что общая система дифференциальных уравнений тепломассопереноса (3.33) и не имеет решений, однако анализ приведенной

выше системы с учетом уравнения кинетики сушки позволил выделить три основных способа интенсификации процессов переноса вещества в капиллярно-пористом теле обмотки электрического двигателя: увеличением разности потенциалов Δt, Δu, Δp; увеличением поверхности контактов материала с теплоносителем; увеличением кинетических коэффициентов (коэффициентов диффузии, сушки, тепло- и массопереноса и др.).

Рассмотрим массоперенос в зависимости от интенсивности изменения давления. В процессе восстановления изоляции электрических двигателей на основе термовакуумной технологии пропитки и сушки обмоток после предварительного вакуумирования через промежуток времени $\Delta\tau$ в сушильно-пропиточной камере давление выравнивается ($\nabla p = 0$), но существенно отличается от давления в емкости с лаком, соединенной с ней трубопроводом с запорным вентилем. Температура в камере, представляющей собой автоклав, за время $\Delta\tau$ тоже примет постоянный характер. В момент времени ($\tau_0 + Д\tau$), где τ_0 – время начала работ по восстановлению электрической изоляции, в автоклав подается пропиточный состав. В этом случае состояние системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса вещества при сушке, изменится.

Принимая критерий фазового перехода равным нулю, т. к. испарение в начальной стадии пропитки при заполнении лаком автоклава отсутствует, в целях упрощения решения можно записать [318, 354]

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial \tau} = D \cdot \nabla^2 u + D \cdot \delta_p \cdot \nabla^2 p; \\ \dfrac{\partial p}{\partial \tau} = a_p \cdot \nabla^2 p. \end{cases} \tag{3.45}$$

Используя теорию подобия, перейдем к безразмерной форме записи (3.45)

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U}{\partial \mathrm{Fo}} = \nabla^2 U + \mathrm{Pn} \cdot \nabla^2 P; \\ \dfrac{\partial P}{\partial \mathrm{Fo}} = \mathrm{Lu} \cdot \nabla^2 P. \end{cases} \tag{3.46}$$

Система уравнений (3.46) описывает процесс пропитки обмоток статоров электродвигателей при изменении давления за промежуток времени $\tau + Д\tau$.

На основе указанных допущений возможен переход к одномерной форме записи (3.46)

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U}{\partial \mathrm{Fo}} = \dfrac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \mathrm{Pn}\dfrac{\partial^2 P}{\partial X^2}; \\ \dfrac{\partial P}{\partial \mathrm{Fo}} = \mathrm{Lu}\dfrac{\partial^2 P}{\partial X^2}. \end{cases} \tag{3.47}$$

Характер изменения давления аппроксимируется линейной функцией

$$p_c(\tau) = e_p \cdot \tau, \tag{3.48}$$

где e_p – скорость создания вакуума в автоклаве.

Краевые условия для рассматриваемой задачи массопереноса получены из законов сохранения вещества и энергии:

$$-\frac{\partial U(1,\mathrm{Fo})}{\partial X} + \mathrm{Bi}[1 - U(1,\mathrm{Fo})] + P(1,\mathrm{Fo}) = 0; \tag{3.49}$$

$$P(1,\mathrm{Fo}) = \mathrm{Pd} \cdot \mathrm{Fo}; \tag{3.50}$$

$$U(X,0) = 0; \tag{3.51}$$

$$P(X,0) = 0; \tag{3.52}$$

$$\frac{\partial P(0,\mathrm{Fo})}{\partial X} = \frac{\partial U(0,\mathrm{Fo})}{\partial X} = 0, \tag{3.53}$$

где $\mathrm{Pd} = \dfrac{e_p \cdot \ell^2}{a_p \cdot p_0}$ – массообменный критерий Предводителева, характеризующий степень изменения давления.

Решение (3.47) совместно с краевыми условиями (3.49) – (3.53) может быть получено с помощью интегрального преобразования Лапласа

$$F_L(X,S) = \int_0^\infty F(X,\mathrm{Fo})\exp(-S \cdot \mathrm{Fo})\,d\mathrm{Fo}. \tag{3.54}$$

Описание процесса нахождения решения системы дифференциальных уравнений (3.47) довольно громоздко. Поэтому, опуская его, достаточно привести конечный результат, т. к. именно он представляет интерес с точки зрения получения связи между безразмерными величинами U и P [4, 9, 58]:

$$U(X,\mathrm{Fo})=\left(\frac{\mathrm{Pn}\cdot\mathrm{Pd}\cdot\mathrm{Lu}}{\mathrm{Lu}^2-1}+\frac{\mathrm{Pd}}{\mathrm{Bi}}\right)\mathrm{Fo}+\frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{Pn}\cdot\mathrm{Pd}\cdot\mathrm{Lu}}{\mathrm{Lu}^2-1}-\frac{\mathrm{Pd}}{\mathrm{Bi}}\right)\left(X^2+1\right)+$$

$$+\left(\frac{\mathrm{Pn}\cdot\mathrm{Pd}\cdot\mathrm{Lu}}{\mathrm{Lu}^2-1}-\frac{\mathrm{Pd}}{\mathrm{Bi}^2}-\frac{1}{\mathrm{Bi}}\right)+1+\frac{\mathrm{Pn}\cdot\mathrm{Pd}\cdot\mathrm{Lu}}{\mathrm{Lu}^2-1}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\cos(\vartheta_m\cdot X)}{\vartheta^3(-1)^{m+1}}\times \tag{3.55}$$

$$\times\exp\left(-\vartheta_m^2\cdot\mathrm{Fo}\right)-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\left(\mathrm{Bi}\cdot\mu_n^2+\mathrm{Pd}\right)\cos(\mu_n\cdot X)\exp\left(-\mu_n^2\cdot\mathrm{Fo}\right)}{\mu_n^3\left(\sin\mu_n+\mu_n\cos\mu_n+\mathrm{Bi}\sin\mu_n\right)};$$

$$P(X,\mathrm{Fo})=\mathrm{Pd}\left[\mathrm{Fo}+\frac{1}{2}\left(X^2+1\right)+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\cos\vartheta_m}{\vartheta^3(-1)^{m+1}}\exp\left(-\vartheta_m^2\cdot\mathrm{Fo}\right)\right], \tag{3.56}$$

где $\vartheta_m=\frac{\pi}{2}(2m-1)$, $\mathrm{ctg}\mu_n=\frac{\mu_n}{\mathrm{Bi}}$.

Найденные решения для нестационарного распределения потенциалов в обмотке статора ЭД мало удобны для практического применения. Следуя [329], запишем приближенное решение, заменяя граничное условие третьего рода граничным условием первого рода. Для этого достаточно осуществить предельный переход $\mathrm{Bi}\to\infty$ в выражениях (3.55) и (3.56).

Тогда решение системы уравнений (3.47) примет более удобный для исследования вид:

$$\begin{cases} U(X,\mathrm{Fo})=\dfrac{\mathrm{Pn}\cdot\mathrm{Pd}\cdot\mathrm{Lu}}{\mathrm{Lu}^2-1}F(X,\mathrm{Fo})+1; & (3.57)\\ P(X,\mathrm{Fo})=\mathrm{Pd}\cdot F(X,\mathrm{Fo}); & (3.58)\\ F(X,\mathrm{Fo})=\mathrm{Fo}+\dfrac{1}{2}\left(X^2+1\right)+\displaystyle\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\cos\vartheta_m}{\vartheta^3(-1)^{m+1}}\exp\left(-\vartheta_m^2\cdot\mathrm{Fo}\right). & (3.59)\end{cases}$$

Из приведенных выражений видно, что между рассматриваемыми величинами U и P существует связь

$$U=\frac{\mathrm{Pn}\cdot\mathrm{Lu}}{\mathrm{Lu}^2-1}P+1, \tag{3.60}$$

т. е. для увеличения концентрации пропиточного состава в теле обмотки необходимо увеличивать градиент давления и критерий Поснова, уменьшая число Лыкова.

Действительно, согласно первому уравнению системы (3.47), чем меньше остаточное давление, тем больше градиент давления и $\frac{\partial^2 P}{\partial X^2}$. Рост ве-

личины $\frac{\partial^2 P}{\partial X^2}$ сопровождается увеличением скорости изменения концентрации $\frac{\partial U}{\partial \mathrm{Fo}}$. Для уменьшения числа Лыкова следует увеличить коэффициент диффузии D, повысив скорость пропитки. Второе уравнение системы (3.47) устанавливает прямую связь между скоростью изменения концентрации лака в обмотке $\frac{\partial U}{\partial \mathrm{Fo}}$ и $\frac{\partial P}{\partial \mathrm{Fo}}$. Критерий Поснова характеризует перепад потенциала массопереноса, вызванный разностью температур или разностью давлений. Он будет возрастать с ростом температуры и разностью перепадов давлений [4].

Полученная зависимость (3.60) справедлива для относительно больших значений критерия Фурье, при которых ряды выражения (3.55) равны нулю. Более точная связь между безразмерными потенциалами относительной концентрации и давления, впервые позволяющая задавать рациональные режимы пропитки и сушки, будет иметь следующий вид [1, 4, 58, 356]

$$U(X,\mathrm{Fo}) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\cos(\mu_n \cdot X)}{\mu_n (-1)^{n+1}} \exp\left(-\mu_n^2 \cdot \mathrm{Fo}\right) + \frac{\mathrm{Pn} \cdot \mathrm{Lu}}{\mathrm{Lu}^2 - 1} P. \qquad (3.61)$$

Непосредственное определение и непрерывная регистрация массосодержания в процессе пропитки обмотки связаны со значительными трудностями. Используя выражение (3.61) и зная критерии подобия Lu и Pn, можно определить относительную безразмерную концентрацию, регистрируя показания прибора контроля изменения вакуума в автоклаве. То есть по характеру изменения *P*, определяющего режим вакуумной пропитки и сушки, можно судить о значениях *U*.

Таким образом, проведенные теоретические исследования процессов переноса вещества в капиллярно-пористом теле обмотки электрического двигателя, а также последующие экспериментальные исследования подтвердили эффективность пропитки с использованием интенсивного изменения давления по отношению к обычной вакуумной пропитке и, тем более, пропитке окунанием [1, 318].

К аналогичным выводам можно прийти и относительно удаления из пористого тела обмотки жидкости и газа посредством скоростного вакуумирования.

3.1.4 Математическое моделирование процесса массопереноса в теле обмотки электродвигателя при скоростном вакуумировании

Как известно, качество пропитки и сушки зависит от достаточно большого количества факторов, учесть которые можно на основе модели процесса массопереноса [350]. Для обоснования и выбора эффективных режимов традиционных для сельского хозяйства способов пропитки и сушки использовалось уравнение переноса вещества из одной части пространства в другую в результате разности относительной концентрации [354, 357].

В связи с тем, что сушка – это энергоемкий и дорогостоящий процесс, сокращение ее продолжительности и определение факторов, влияющих на указанный процесс, является крайне важной задачей. Рассмотрим перенос жидкости в капиллярно-пористом теле статорной обмотки. Так как в этом случае количество жидкости, связанной физико-механическим путем, намного превосходит количество жидкости, имеющей другую природу связи со скелетом тела обмотки статора, последнюю на данном этапе можно не учитывать [338, 358, 359].

Результаты проведенного анализа термодинамики процессов фазовых переходов [338, 360] позволяют утверждать, что испарение, с одной стороны, определяется разностью давлений насыщенного пара жидкости при данной температуре, а с другой – структурой пропитываемого материала, в частности обмотки. В основе процессов сушки заложено стремление к достижению фазового равновесия, при котором имеет место равенство химических потенциалов жидкого вещества и его паров. При достижении такого равновесия процесс сушки обмоток прекращается, т. е. сушка является неравновесным процессом, обусловленным разностью химических потенциалов.

Кроме того, процесс сушки влажных материалов – не только теплофизический, но и технологический процесс, в характере протекания которого решающую роль играет форма связи вещества с материалом [360 – 364]. Характер изменения влажности материала в процессе сушки можно представить в виде некоторой кривой сушки, отображающей зависимость

$$\omega = f(\tau), \tag{3.62}$$

где ω – влажность материала в процентах.

Весь процесс сушки изоляции обмоток можно разбить на три стадии [100, 365, 366]. В начале процесса убыль влагосодержания происходит медленно. В этот сравнительно небольшой промежуток времени температура во всех точках обмотки увеличивается. Данная стадия процесса сушки называется начальной или стадией нагрева материала.

После начальной стадии влагосодержание материала уменьшается с течением времени по линейному закону и количество подводимого тепла становится равным теплу, расходуемому на испарение. Этот период сушки можно назвать периодом постоянной скорости, который характеризуется не-

изменяемой температурой материала $\left(\frac{dt}{d\tau}=0\right)$. В установившемся режиме первого периода сушки происходит в основном испарение влаги с поверхности твердого тела и диффузия в окружающую среду. Движущей силой процесса является разность парциальных давлений паров на поверхности материала обмотки и в окружающем воздухе. Испарение с поверхности материала создает градиент влажности между поверхностным и последующими слоями обмотки статора и вызывает перемещение жидкости по направлению к высушиваемой поверхности. Установлено, что влага из толщи материала может подводиться к его поверхности по капиллярам в виде жидкости или пара. Сорбционно-связанная влага диффундирует к поверхности только в виде пара.

Первый период продолжается до некоторого влагосодержания, начиная с которого температура материала повышается с течением времени, а скорость сушки уменьшается. Влагосодержание, соответствующее переходу первого периода во второй, называют критическим влагосодержанием.

Для второго периода сушки характерен внутренний тепломассоперенос, который в упрощенном виде может быть описан уравнением [32, 329, 360, 365]

$$-\frac{\partial\omega}{\partial\tau}=k\left(\omega-\omega_{\text{р}}\right), \tag{3.63}$$

где k – коэффициент сушки, зависящий от режима сушки; $\omega_{\text{р}}$ – равновесное влагосодержание;

$$k=\frac{N}{\omega_{\text{к.п}}-\omega_{\text{р}}}=\chi\cdot N, \tag{3.64}$$

где χ – коэффициент, зависящий от свойств материала и его влажности; $\omega_{\text{к.п}}=1/\chi+\omega_{\text{р}}$ – приведенное критическое влагосодержание.

Путем интегрирования (3.63) можно получить следующую экспоненциальную зависимость

$$\frac{\omega-\omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{к.п}}-\omega_{\text{р}}}=\exp\left(-k\cdot\tau\right)=\exp(\chi\cdot N\cdot\tau). \tag{3.65}$$

Как видно из приведенных выражений, скорость сушки определяется градиентом текущего и равновесного влагосодержания [367].

На рисунке 3.2 представлена типичная кривая скорости сушки коллоидного капиллярно-пористого тела, не подверженного усадке при сушке, каковым является обмотка статора, пропитанная лаком [360].

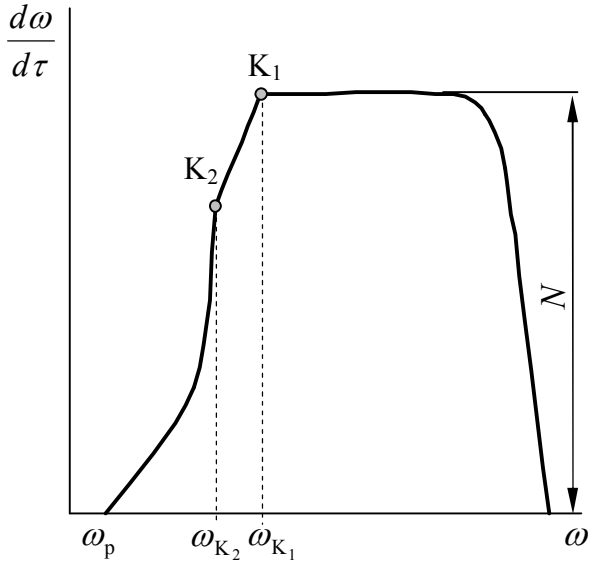


Рисунок 3.2 – Кривая скорости сушки:
$К_{1,2}$ – точки критического влагосодержания; $\omega_н$ – начальная влажность

В первой критической точке влагосодержание на поверхности материала равно гигроскопическому содержанию, а во второй – такому влагосодержанию поверхностного слоя, при котором капиллярное состояние заменяется канатным [360].

Для кривой скорости сушки можно записать

$$\left(\frac{1}{N}\cdot\frac{d\omega}{d\tau}\right)=-\left[1-\chi_1\left(\omega_{K_1}-\omega\right)\right] \text{ при } \omega_{K_2}<\omega<\omega_{K_1};$$
$$\left(\frac{1}{N}\cdot\frac{d\omega}{d\tau}\right)=-\chi_2\left(\omega-\omega_р\right) \text{ при } \omega_{K_2}>\omega>\omega_р. \quad (3.66)$$

Второе критическое влагосодержание определяется по формуле

$$\omega_{K_2}=\frac{1-\chi_1\cdot\omega_{K_1}+\chi_2\cdot\omega_р}{\chi_2-\chi_1}. \quad (3.67)$$

Интегрирование уравнений (3.66) дает

$$\left(\omega_{K_1}-\omega\right)=\frac{1}{\chi_1}\left[1-\exp\left(-\chi_1\cdot N\cdot\tau\right)\right];$$
$$\left(\omega-\omega_р\right)=\left(\omega_{K_2}-\omega_р\right)\exp\left(-\chi_2\cdot N\cdot\tau\right). \quad (3.68)$$

Первая формула (3.68) является уравнением кривой сушки в первой зоне периода падающей скорости $\left(\omega_{\text{К}_2} < \omega < \omega_{\text{К}_1}\right)$, а второе выражение – во второй зоне этого периода $\left(\omega_{\text{р}} < \omega < \omega_{\text{К}_2}\right)$.

Используя полученные уравнения кривой сушки в периоде падающей скорости, можно найти формулу для расчета общей продолжительности процесса сушки

$$\tau = \frac{1}{N}\left[\left(\omega_0 - \omega_{\text{К}_1}\right) + \frac{2{,}3}{\chi_1}\lg\chi_1\left(\omega_{\text{К}_1} - \omega_{\text{К}_2}\right) + \frac{2{,}3}{\chi_2}\lg\frac{\omega_{\text{К}_2} - \omega_{\text{р}}}{\omega - \omega_{\text{р}}}\right]. \qquad (3.69)$$

Из выражений, полученных при выводе уравнения для расчета продолжительности процесса сушки обмоток электродвигателей, можно увидеть, что чем выше температура сушки, тем быстрее происходит удаление летучих и влаги из обмотки. По данным Харьковского электромеханического завода [142], при увеличении температуры предварительной сушки со 110 – 120 до 130 – 140 °С продолжительность сушки может быть сокращена с 8 до 4 ч. Однако температура сушки для каждого типа изоляции должна быть ограничена в зависимости от ее нагрево- и теплостойкости во избежание ускоренного старения и деформации [32]. В свою очередь, вакуумная сушка позволяет значительно ускорить процесс удаления влаги из обмоток, поэтому при ней температура сушки может быть снижена на 20 – 30 °С по сравнению с сушкой при атмосферном давлении.

В условиях вакуума сушка изоляции обмотки, содержащей адсорбционно-связанную влагу, протекает в период падающей скорости при непрерывном повышении температуры материала и наличии внутри материала перепадов температуры. Внутренний массоперенос при этом определяется интенсивностью фильтрационно-диффузионного пара под действием существенного градиента давления, причем в первом приближении можно предположить, что в гигроскопической области критерий фазового перехода равен единице и парциальное давление пара внутри материала является функцией локального влагосодержания и температуры. С учетом этого в линейном приближении систему дифференциальных уравнений тепломассопереноса (3.33) можно записать следующим образом [100, 327]

$$\begin{cases} \dfrac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t + \dfrac{r \cdot \partial u}{c \cdot \partial \tau}\ ; \\ \dfrac{\partial u}{\partial \tau} = \dfrac{k_p}{\rho_0} \cdot \nabla^2 p. \end{cases} \qquad (3.70)$$

Поскольку в гигроскопической области влагосодержание материала является функцией p и t,

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = c_{mt} \frac{\partial p}{\partial \tau} + c_{mp} \frac{\partial t}{\partial \tau}. \tag{3.71}$$

Тогда систему дифференциальных уравнений (3.70), описывающих процессы молярно-молекулярного тепломассопереноса при вакуумной термообработке капиллярно-пористых тел, согласно работе [368], можно записать так:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial t}{\partial \tau} = \dfrac{a}{1-K} \nabla^2 t + \dfrac{c_{mt} \dfrac{r}{c}}{1-K} \dfrac{\partial p}{\partial \tau}; \\ \dfrac{\partial p}{\partial \tau} = (1-K) a_p \cdot \nabla^2 p - \dfrac{c_{mp}}{c_{mt}} a \cdot \nabla^2 t, \end{cases} \tag{3.72}$$

где

$$K = \frac{r \cdot c_{mp}}{c}; \tag{3.73}$$

$$a_p = \frac{k_p}{c_{mt} \cdot \rho_0}; \tag{3.74}$$

$$c_{mp} = \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_p; \tag{3.75}$$

$$c_{mt} = \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_t. \tag{3.76}$$

Уравнения (3.75) и (3.76) – соответственно изобарная и изотермическая массоемкости материала, определяемые из уравнения равновесного влагосодержания.

Применительно к условиям вакуумной сушки нагревание цилиндрического многослойного элемента изоляции принимается при граничных условиях третьего рода, причем величина эффективного коэффициента теплообмена считается постоянной.

На основе принятой физической схемы поставленная одномерная задача тепломассопереноса (3.72) для неограниченного цилиндра (моделирующего многослойный цилиндрический образец изоляции) при постоянных начальных условиях в безразмерной форме записи математически может быть сформулирована следующим образом [329, 360]:

$$\frac{\partial T(X, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \frac{1}{1-K} \left(\frac{\partial^2 T(X, \mathrm{Fo})}{\partial X^2} + \frac{1}{X} \frac{\partial T(X, \mathrm{Fo})}{\partial X} + \frac{\mathrm{Bu}}{1-K} \frac{\partial P(X, \mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} \right); \tag{3.77}$$

$$\frac{\partial P(X,\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = (1-K)\mathrm{Lu}_{\beta}\left(\frac{\partial^2 P(X,\mathrm{Fo})}{\partial X^2} + \frac{1}{X}\frac{\partial P(X,\mathrm{Fo})}{\partial X}\right) - \\ -\frac{K}{\mathrm{Bu}}\left(\frac{\partial^2 T(X,\mathrm{Fo})}{\partial X^2} + \frac{1}{X}\frac{\partial T(X,\mathrm{Fo})}{\partial X}\right). \tag{3.78}$$

Для варианта симметричной задачи

$$T(0,\mathrm{Fo}) \neq \infty; \quad P(0,\mathrm{Fo}) \neq \infty; \tag{3.79}$$

$$\frac{\partial T(0,\mathrm{Fo})}{\partial X} = \frac{\partial P(0,\mathrm{Fo})}{\partial X} = 0. \tag{3.80}$$

Граничные условия

$$\frac{\partial T(1,\mathrm{Fo})}{\partial X} - \mathrm{Bi}[1 - T(1,\mathrm{Fo})] = 0; \tag{3.81}$$

$$P(1,\mathrm{Fo}) = -1; \tag{3.82}$$

$$T(X,0) = P(X,0) = 0. \tag{3.83}$$

Решение уравнений (3.77) и (3.78) при условиях (3.79) – (3.83) примет вид

$$T(X,\mathrm{Fo}) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{2} C_{nj} \cdot J_0(\nu_j \cdot \mu_n \cdot X)\exp(-\mu_n{}^2 \cdot \mathrm{Fo}); \tag{3.84}$$

$$P(X,\mathrm{Fo}) = -\left[1 + \frac{1}{\mathrm{Bu}}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{2} C_{nj}(\nu^2 + K - 1)J_0(\nu_j \cdot \mu_n \cdot X)\exp(-\mu_n{}^2 \cdot \mathrm{Fo})\right], \tag{3.85}$$

где ν_j, C_{nj} – коэффициенты (j=1, 2); μ_n – корни характеристического уравнения.

Средние значения потенциалов переноса определяются по соотношениям

$$\overline{T}(\mathrm{Fo}) = 2\int_0^1 X \cdot T(X,\mathrm{Fo})\,dX; \tag{3.86}$$

$$\overline{P}(\mathrm{Fo}) = 2\int_0^1 X \cdot P(X,\mathrm{Fo})\,dX, \tag{3.87}$$

откуда получаем следующие уравнения:

$$\overline{T}(\mathrm{Fo}) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{2} D_{nj}\exp\left(-\mu_n{}^2 \cdot \mathrm{Fo}\right); \tag{3.88}$$

$$\overline{P}(\mathrm{Fo}) = -\left[1 + \frac{1}{\mathrm{Bu}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{2} D_{nj}\exp\left(-\mu_n{}^2 \cdot \mathrm{Fo}\right)\right], \tag{3.89}$$

где $$D_{nj} = 2C_{nj}\frac{J_1(\nu_1 \cdot \mu_n)}{\nu_j \cdot \mu_n} \quad (\mathrm{j} = 1, 2). \tag{3.90}$$

Полученное аналитическое решение может быть использовано для анализа основных закономерностей тепломассопереноса и нестационарных полей температуры, внутреннего парциального давления и влажности материала при вакуумной сушке пористых тел, имеющих форму цилиндра.

Следует заметить, что обычную вакуумную сушку при остаточном давлении в автоклаве $p > 150$ мм рт. ст. в первом приближении можно представить как радиационно-кондуктивную, причем в процессе вакуумирования степень радиационного механизма сушки должна возрастать из-за уменьшения поглощения излучения стенок автоклава, в котором осуществляется сушка, молекулами газа и пара, т. е. механизм сушки с медленным (более 60 с) набором вакуума аналогичен механизму атмосферной сушки с конвекционным или радиационным подводом тепла и сопровождается релаксацией давления паров.

Проведенные исследования [1, 4, 58, 99, 369], результаты которых нашли отражение в данном разделе работы, показали, что быстрое создание градиента давления от атмосферного до 100 – 150 мм рт. ст. резко увеличивает удаление жидкости из обмотки. В отличие от обычной вакуумной сушки, интенсивный сброс давления не приводит к постепенной релаксации давления паров. Поэтому они переходят в перегретое состояние с температурой перегрева 65 – 70 °С, что соответствует перегретому состоянию пара при температуре 150 – 170 °С, т. е. давлению порядка десяти атмосфер. При таких условиях происходит интенсивное испарение жидкости с поверхности тела и ее охлаждение до температуры ниже температуры конденсации при данном давлении. Температура внутри изоляции остается несколько выше поверхностной. Это приводит к тому, что образовавшиеся пары своим избыточным давлением выталкивают жидкость, сконденсировавшуюся на поверхности изоляции, в объем газовой фазы [367]. Это хорошо прослеживается по кривым кинетики сушки, представленным на рисунке 3.3.

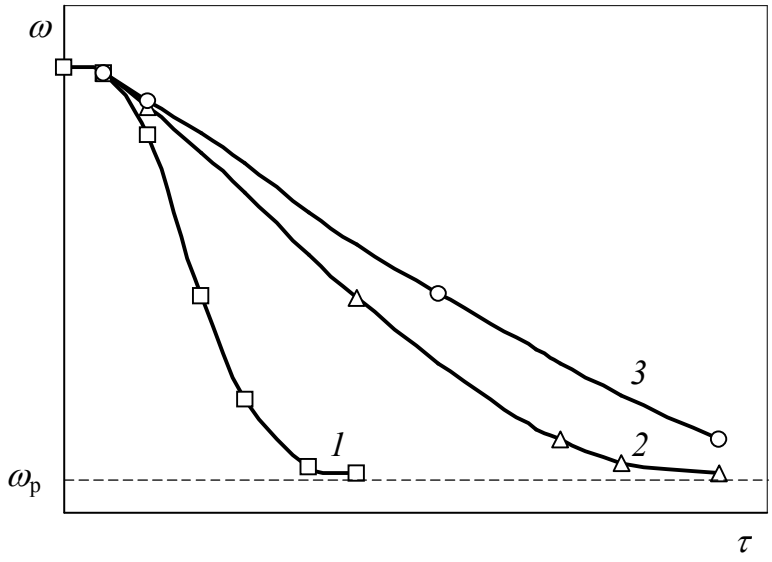


Рисунок 3.3 – Кривые кинетики сушки в общем виде:
1 – изменение влагосодержания скоростным вакуумированием; *2* – изменение влагосодержания медленным набором вакуума; *3* – изменение влагосодержания в процессе сушки конвекцией

Как видно из данного рисунка, продолжительность сушки для кривой *1* существенно сокращается. Количество испарившейся жидкости с поверхности изоляции за счет теплоты испарения при интенсивном изменении давления с предварительным нагревом до 70 – 100 °С составляет не более 4 – 5 % всей удаляемой жидкости. Остальное ее количество выносится из изоляции без фазового перехода, т. е. за счет быстрого создания градиента давления.

Математическое представление описанного термовакуумного процесса сушки изоляции электрических машин рассмотрим далее.

Упрощенное решение системы (3.33) при линейном характере сброса давления

$$p_c(\tau) = p_0 - e_p \cdot \tau\,, \quad t_c(\tau) = t_c - e_p \cdot \tau \tag{3.91}$$

может быть получено на основе предположений, что молекулярное слагаемое переноса вещества мало по сравнению с членом фазового перехода, а за счет только конвективного подвода тепла при скоростном вакуумировании можно удалить незначительную часть связанного вещества от всей удаляемой массы из обмотки.

Тогда решением (3.33) будут зависимости [4, 58, 365]

$$T = \frac{(1-\&)\mathrm{Ko}\cdot\mathrm{Ra}\cdot\mathrm{Lu}_p^2\left(1-\lambda_p^*\right)\mathrm{Pd}_p}{V^2}F(X,\mathrm{Fo}); \tag{3.92}$$

$$U = \frac{\mathrm{Ra}\cdot\mathrm{Lu}_p^2\left(1-\lambda_p^*\right)\mathrm{Pd}_p}{V^2}F(X,\mathrm{Fo}); \tag{3.93}$$

$$P = \frac{\mathrm{Lu}_p\cdot\mathrm{Pd}_p}{V}F(X,\mathrm{Fo}); \tag{3.94}$$

$$F(X,\mathrm{Fo}) = V\cdot\mathrm{Fo} - \frac{1}{2}\left(1-X^2\right) + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{\mu_n^3}f(\mu_n\cdot X)\mathrm{e}^{-\mu_n^2\cdot\mathrm{Fo}}, \tag{3.95}$$

где λ_p^* – отношение молярной проводимости вещества в жидкой и паровой фазах; & – критерий термомеханического увлечения вещества в жидкой фазе; $\mathrm{Ra} = \frac{C_q\cdot C_\mathrm{B}\cdot\Delta P}{\Delta U}$ – число Рамзина; C_q – теплоемкость вещества; C_B – емкость капиллярного тела по отношению к воздуху.

В выражениях (3.92) – (3.95) применены также следующие обозначения:

$$V = \mathrm{Lu}_p[1-(1-\&)\left(1-\lambda_p^*\right)\left(1+\mathrm{Ko}\cdot\mathrm{Ra}\cdot\mathrm{Lu}_p\right)]; \tag{3.96}$$

$$f(\mu_n\cdot X) = (-1)^{n+1}\cos(\mu_n\cdot X). \tag{3.97}$$

Из приведенных решений видно, что между потенциалами *T*, *U* и *P* существует некоторая связь. Связь между безразмерной температурой и безразмерным потенциалом массосодержания имеет вид

$$U = \frac{1}{(1-\&)\mathrm{Ko}}T. \tag{3.98}$$

В формуле (3.98) критерий Ko характеризует компоненты связанного вещества в обмотке статора.

Таким образом, зная физические параметры удаляемого компонента из обмотки, критерий термомеханического увлечения и безразмерную температуру *T*, можно определить количество удаляемого компонента. И наоборот, зная количество удаленного компонента, безразмерную температуру, можно найти критерий & и, значит, поток вещества, удаленного с помощью термомеханического увлечения в жидкой фазе [367].

Из решений математических моделей пропитки и сушки обмоток электрических двигателей, рассмотренных в настоящем разделе, следует, что безразмерный потенциал массосодержания прямо пропорционален безразмерным величинам температуры и давления, а следовательно, скорости их изменения [355]. Другими словами, за одинаковые промежутки времени безразмерная относительная концентрация больше изменится в том случае, в котором скорость изменения указанных величин выше. Однако создание значительного градиента температуры является технологически сложной задачей, тогда как скорость изменения давления обусловлена лишь быстродействием используемого запорного вакуумного оборудования [1, 318].

3.1.5 Анализ изменения свойств изоляции обмоток статоров электродвигателей в различных условиях пленкообразования

Если взять за основу анализа изменения свойств изоляции обмоток статоров электродвигателей в различных условиях пленкообразования общую теорию системного исследования, то становится очевидным применение микроскопического подхода к рассматриваемой вероятностной системе, который подразумевает детальное изучение поведения каждой из ее подсистем.

Как уже отмечалось, более 90 % промышленных лаков и красок содержат растворители, поэтому изучению условий пленкообразования отводят не последнюю роль в решении задач повышения качества восстановления изоляции ЭД. Действительно, пренебрежение данными условиями даже в случае выполнения операций по пропитке и сушке с максимальным эффектом может привести к нарушению структуры покрытий и, как следствие, ухудшенным свойствам изоляции [324].

С кинетической точки зрения процесс испарения растворителей можно разделить на две стадии:

- испарение из жидкой пленки, контролируемое поверхностными явлениями;
- испарение из сформировавшейся твердой пленки, определяемое диффузионными процессами в массе полимерного материала.

Первую стадию из-за низкой вязкости и наличия конвективного перемешивания раствора можно рассматривать как испарение растворителей со свободной поверхности. Вторая стадия испарения обычно начинается при содержании растворителя в пленке 5 – 10 %, когда вязкость раствора довольно высока и вследствие этого не происходит его конвективного перемешивания. Скорость улетучивания растворителей на этой стадии контролируется внутренней диффузией.

При отвердевании пленки (переходе полимера в стеклообразное состояние), вязкость пленкообразователей достигает 10^{11} – 10^{12} Па·с. В этих условиях коэффициент диффузии растворителей крайне мал и обычно не превышает 10^{-7} см^2/с. Это затрудняет их диффузионный перенос особенно на последних стадиях формирования покрытий. Вследствие односторонней диф-

фузии в пленке всегда имеет место определенный градиент концентрации растворителя по толщине: его содержание возрастает от периферии к подложке.

Испарение растворителей сопровождается изменением многих параметров системы: уменьшается объем материала, в основном, за счет толщины слоя, увеличивается поверхностное натяжение, понижается температура пленки вследствие затраты теплоты на парообразование.

Эти изменения сказываются на структуре и свойствах образующихся покрытий. Особенно сильно влияют на структурные характеристики и внешний вид покрытий природа растворителя, его термодинамическое «качество» по отношению к пленкообразователю, поверхностное натяжение и летучесть (скорость испарения из пленки). Наиболее качественные покрытия получаются из стабильных растворов, пленкообразование из которых не связано с фазовыми превращениями системы.

Напротив, часто встречающиеся дефекты пленок – шагрень (апельсиновая корка), лучевидные разводы, сотовая структура (образование так называемых ячеек Бенарда), кратеры – обычно возникают при применении недостаточно хороших в термодинамическом отношении растворителей с высоким давлением паров и низким поверхностным натяжением [324].

Механизм поверхностного структурообразования заключается в следующем [366]. При улетучивании растворителей ввиду неодинаковой концентрации растворителя в поверхностном и внутренних слоях создается градиент поверхностного натяжения по толщине пленки

$$Д\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 . \qquad (3.99)$$

Его значение тем больше, чем больше градиент концентрации растворителя, и тем сильнее различаются поверхностные натяжения пленкообразователя и растворителя.

Наличие градиента $Д\sigma$ вызывает образование турбулентных потоков в растворе, которые и создают соответствующий рельеф его поверхности. При достижении высокой вязкости лакокрасочного материала в поверхностном слое этот рельеф фиксируется в пленке в виде соответствующего рисунка, образование которого нежелательно, т. к. снижается блеск и ухудшается внешний вид покрытия. Так, растворы полистирола и поливинилацетана в бутилацетате и метилизобутилкетоне (σ = 25 – 26 МДж/м^2) формируют покрытия с различной формой рисунка на поверхности материала.

С другой стороны, при использовании менее летучего растворителя – циклогексанона (σ = 34,5 МДж/м^2) на поверхности изоляции образуются ровные, лишенные какого-либо рельефа пленки.

Образование кратеров – результат локальной концентрации градиента поверхностного натяжения, вызванного присутствием в пленке инородных включений (микрокапли воды и другие примеси). Для исключения кратеров в

состав лаков вводят противократерные добавки – вещества, снижающие поверхностное натяжение пленкообразователя (кремнийорганическая жидкость ПЭС-С-1, состав БИК-344 и др.).

При формировании покрытий из растворов, как и из любых жидких лакокрасочных материалов, различают два состояния пленок: высыхание «от пыли», когда пленка утрачивает липкость, и практическое высыхание, когда покрытие приобретает твердость, необходимую для последующей обработки изделий.

Время высыхания «от пыли» обычно коррелирует с продолжительностью испарения из пленки примерно 60 % растворителей, растекание же лакокрасочного материала на поверхности прекращается уже при испарении 25 – 30 % растворителей.

О завершенности процесса формирования покрытий обычно судят по их твердости, липкости, электрическим параметрам. Количественными показателями качества покрытий, определяющими срок службы лакокрасочных покрытий в атмосферных условиях, могут служить следующие оценки.

Растекаемость (разлив) лакокрасочного материала является важным технологическим показателем, т. к. только при хорошей растекаемости можно получить гладкую и ровную пленку без потеков, кратеров, шагрени и др.

Удовлетворительного разлива можно достичь только в том случае, когда лакокрасочный материал характеризуется малым пределом текучести, который сохраняется низким в течение нескольких минут после нанесения материала.

Разлив, как реологический процесс, может быть описан следующим уравнением

$$h = \frac{b^2 \cdot f}{8\sigma}, \qquad (3.100)$$

где h и b – соответственно высота и ширина штриха; f – предел текучести.

О поверхностном натяжении на границе раствор (расплав) – подложка косвенно судят по смачиваемости твердой поверхности раствором или расплавом, характеризующейся, как уже было показано ранее, краевым углом смачивания θ.

При минимальном краевом угле создаются благоприятные условия для получения бездефектных пленок за счет хорошей растекаемости материала и, следовательно, достигаются высокие декоративные и защитные характеристики покрытий [342].

Для пленок, отвержденных при 120 и 180 °С в течение 1 ч, значения твердости при 20 ± 0,5 °С высоки и близки (соответственно 0,78 и 0,87).

Результаты [370], полученные при измерении твердости H этих пленок в интервале температур от 20 до 100 °С и представленные на рисунке 3.4, по-

казывают, что при 40 °С твердость пленки, отвержденной при 120 °С, начинает заметно понижаться, а при 100 °С она снижается более чем в 2 раза. В то же время твердость пленки, отвержденной при 180 °С, при повышении температуры измерения достигает значения 0,8 о. е. уже при 40 °С и остается постоянной вплоть до 100 °С.

Измерение твердости покрытий в интервале температур дает возможность судить не только о физическом состоянии пленкообразователя и переходе его в трехмерную структуру, но и о теплостойкости покрытия.

Практическая реализация сделанных теоретических предпосылок позволила внести необходимые коррективы в выбор режимов термовакуумной пропитки и сушки [371]. Приведенные в [9, 158] параметры процесса восстановления электрической изоляции давали хорошие результаты при их использовании на макетах лобовых и пазовых частей обмоток. Однако практика показала, что при глубине вакуума 10 – 100 мм рт. ст. и времени вакуумирования до 10 с, несмотря на высокую степень проникновения лака и монолитность статорной обмотки, в межвитковом пространстве возникают неоднородности лакового покрытия, пористость [324].

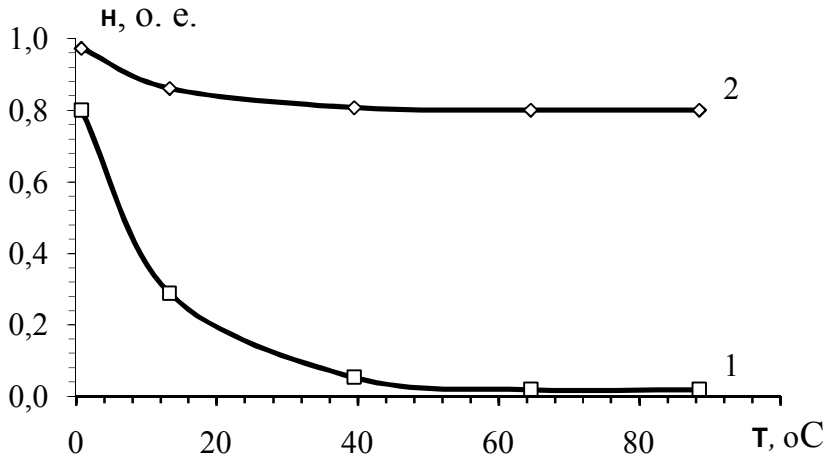


Рисунок 3.4 – Зависимость твердости пленки лака ВЛ-51 от температуры при различных режимах отверждения: *1* – 1 ч при 120 °С; *2* – 1 ч при 180 °С

Во избежание подобного явления был проведен цикл экспериментальных исследований по отработке режимов скоростной вакуумной пропитки и сушки на конкретных электродвигателях, непосредственно использующихся в сельскохозяйственном производстве, результаты которых представлены ниже [371].

Таким образом, результаты теоретических исследований процессов переноса энергии и вещества в обмотке электрического двигателя позволили получить новые закономерности, которые имеют место в процессе разрушения свя-

зующего обмоток, пропитки, сушки и полимеризации изоляции, когда создание градиента давления от 760 до 100 – 150 мм рт. ст. за время 0,1 – 10 с не приводит к постепенной релаксации давления паров и обеспечивает до 95 % удаления влаги и растворителя из изоляции двигателя без фазового перехода. Однако полученные результаты аналитического решения системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса являются недостаточными для выявления рациональных режимов протекания рассматриваемых процессов и разработки эффективной технологии ремонта ЭД. Необходимо провести комплекс дополнительных исследований тепло- и массообмена в теле обмотки двигателя с последующим информационно-логическим анализом полученной информации.

3.2 Экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса в обмотках электрических двигателей при восстановлении изоляции

Все экспериментальные исследования процессов разрушения связующего, пропитки и сушки систематизированы и опираются на методологию системного анализа. В результате теоретических исследований тепломассопереноса при пропитке и сушке обмоток электродвигателей была выделена основная движущая сила, ускоряющая эти процессы, – это скорость изменения градиентов температуры и давления [1, 326].

Цель проведенного комплекса экспериментальных исследований, направленных на подтверждение результатов научно-исследовательской работы, – обоснование рациональных режимов скоростной термовакуумной пропитки и сушки с точки зрения сокращения длительности технологического процесса, снижения материальных и энергетических затрат, повышения качества изделий, от которого во многом зависит их тепло- и влагостойкость, механическая и электрическая прочность, а также разработка новой эффективной технологии пропитки и сушки изоляции обмоток не только для использования на специализированных ремонтных предприятиях агропромышленного комплекса, но и непосредственно в условиях эксплуатации [372].

Для достижения поставленной цели предложена и создана при непосредственном участии автора многофункциональная электротермовакуумная установка (патент № 2191461), обеспечивающая проведение сравнительных экспериментов по реализации различных способов пропитки и сушки электрических двигателей при изменении режимных параметров в широких пределах [373]. На рисунке 3.5 показан общий вид и функциональная схема установки разрушения связующего обмоток, пропитки и сушки изоляции электродвигателей, а ниже приведены ее технические характеристики:

1) глубина вакуума, создаваемого в ресивере, мм рт. ст. 2) диапазон изменения температуры в автоклаве, °С 3) время набора заданной температуры (max – min), мин 4) время набора вакуума в ресивере, мин 5) время создания заданной глубины вакуума в автоклаве, с	10 – 760; 20 – 200; 60 – 10; 10 – 15; 0,1 – 60.

Методической основой экспериментальной части работы стали результаты анализа существующих методов восстановления работоспособности сельскохозяйственного электрооборудования, а также способов их практической реализации [1, 58, 145].

Результаты исследований, приведенные в [112], позволили использовать для оценки каждого этапа технологического процесса следующие показатели. Качество выполнения обмоточно-изолировочных работ может быть оценено сопротивлением изоляции обмотки относительно корпуса $R_к$ и межвитковым сопротивлением $R_в$. Этапы сушки до пропитки и сушки после пропитки сходны по протекающим физическим процессам. Поэтому для них будут характерны одни и те же критерии качества: $R_к$, $R_в$, влагоудаление Δw, коэффициент пропитки $K_п$. Качество пропитки можно оценить следующими частными показателями качества: глубиной проникновения лака h, лакопоглощением w, коэффициентом пропитки $K_п$.

При этом межвитковое сопротивление измеряется путем подачи напряжения на два провода, принадлежащих соседним виткам (в пропитанном электродвигателе витковой изоляцией служат эмалевая изоляция провода и пропиточный состав, заполнивший пространство между проводами). Серьезнейшим недостатком этого частного показателя качества является то, что он не может быть измерен в условиях эксплуатации электрической машины. Метод определения этого показателя – разрушающий.

В свою очередь, корпусное сопротивление измеряется путем создания разности потенциалов между обмоткой и корпусом электродвигателя. Как и в предыдущем случае, измеряемое сопротивление является суммарным для изоляции проводов обмотки, корпусной изоляции и пропиточного лака.

Влагоудаление Δw определяется как разность между относительным содержанием влаги в обмотке до сушки и после нее. Кроме того, этот параметр может быть измерен путем пропускания через обмотку постоянного стабилизированного тока и одновременного измерения падения напряжения на обмотке [374].

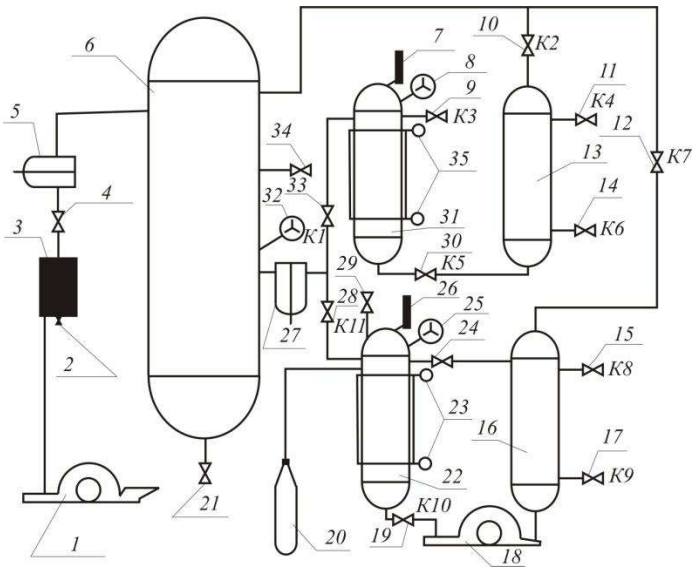


Рисунок 3.5 – Универсальная электротепловая вакуумная лабораторная установка разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток электрических двигателей: *1* – вакуумный насос; *4*, *9-12*, *14*, *15*, *17*, *19*, *24*, *28*, *29*, *30*, *33*, *34* – вентили; *6* – ресивер; *13* – смесительный котел; *16* – резервуар для водного раствора; *18* – циркуляционный насос; *22* – автоклав для разрушения связующего; *31* – автоклав для пропитки и сушки

Коэффициент пропитки K_n для этапа сушки до пропитки показывает, насколько эффективно будет проведена пропитка при сушке обмотки по данной технологии [317]. Коэффициент пропитки K_n для этапа пропитки отражает долю объема обмотки, заполненного лаком при пропитке. Как правило, не удается полностью заполнить весь объем тела обмотки и K_n всегда меньше единицы. Определить коэффициент пропитки можно по методике, предлагаемой в [375, 376].

Величина h характеризует глубину проникновения пропиточного состава в тело обмотки. Параметр измеряется визуально при распиливании опытно-

го образца. Большим недостатком является то, что метод измерения h разрушающий, т. е. после измерения образец не может быть восстановлен и не может эксплуатироваться.

Лакопоглощение w характеризует общее количество пропиточного состава, попавшего в обмотку при пропитке. Величину w находят путем определения разности взвешивания обмотки до и после пропитки.

Оценивание качества изоляции, обеспечиваемого всеми этапами технологии, заслуживает особого рассмотрения. Вызвано это тем, что проверить состояние изоляции обмотки можно рядом критериев, применяемых как для определения эффективности сушки после пропитки, так и для оценки состояния изоляции электрических машин. Кроме того, можно ввести ряд новых критериев, использовавшихся для оценки качества отдельных этапов технологии. В качестве частных показателей качества примем: межвитковое сопротивление $R_{в\,\mathrm{I+II+III+IV+V}}$, сопротивление изоляции относительно корпуса $R_{к\,\mathrm{I+II+III+IV+V}}$, пробивное напряжение корпусное $U_{\text{пк}}$, пробивное напряжение витковое $U_{\text{пв}}$, влагоудаление $Дw_{\mathrm{I+II+III+IV+V}}$, емкостный параметр $ДC_к$.

Пробивное витковое напряжение $U_{\text{пв}}$ – это напряжение, приложенное к изоляции витка, при котором происходит ее пробой. В качестве числового значения обычно принимается вероятное значение пробивного виткового напряжения. В свою очередь, пробивное корпусное напряжение $U_{\text{пк}}$ – это напряжение, при котором, в большинстве случаев, происходит пробой корпусной изоляции. Наиболее качественно пропитанная изоляция электрической машины имеет более высокие значения как витковых, так и корпусных пробивных напряжений. При этом снижается вероятность пробоя изоляции при эксплуатации. Основным недостатком оценки качества как по корпусному, так и витковому пробивным напряжениям является то, что методы их определения – разрушающие. После определения одной из двух характеристик электродвигатель нужно ремонтировать, чтобы в дальнейшем использовать в эксплуатации.

Емкостный параметр $ДC_к$ отражает увеличение емкости между обмоткой и корпусом электрической машины вследствие пропитки. Чем больше параметр, тем выше диэлектрические свойства изоляции обмотки. Он находится как разность значений корпусной емкости после пропитки и до пропитки.

3.2.1 Комплекс экспериментов по пропитке и сушке изоляции электродвигателей различными методами

Как уже отмечалось, наиболее производительным оборудованием ремонтных предприятий на сегодняшний день являются сушильно-пропиточные установки, выполненные по типу АВБ фирмы «Хитека». Но, как показали проведенные автором исследования [1, 4, 9], времени работы установки перед тем как обмотка электрической машины попадет в автоклав, достаточно для возникновения воздушных пробок в порах и капиллярах тела

обмотки, снижающих проникновение в них пропиточного состава. Эксперименты, выполненные на универсальной лабораторной установке, подтвердили вывод о том, что после предварительной сушки необходимо исключить контакт обмотки с воздушной средой.

Сложившаяся последовательность проведения отдельных технологических операций пропитки и сушки статорных обмоток на каждом из этапов преследует достижение вполне определенной цели. Рассмотрим данную последовательность с точки зрения экспериментальной проверки сделанных теоретических утверждений об эффективности способа восстановления изоляции электродвигателей.

На первом этапе указанного процесса осуществляется прогрев обмоток и их предварительная сушка. Целью данного этапа является удаление из обмоток и их изоляции влаги и воздушных включений, снижающих электрическую прочность изоляции, а также создание благоприятных условий для адгезии и более полного проникновения пропиточного состава в обмотку [377].

На рисунке 3.6 показаны зависимости коэффициентов пропитки обмоток, выполненных проводом ПЭТ-155 диаметром 0,75 мм, от времени пропитки и способа предварительной сушки: конвекцией, медленным набором вакуума, со временем создания вакуума в автоклаве более 30 с, и скоростным вакуумированием, исключающим контакт обмоток с атмосферой. Наибольшее проникновение пропиточного состава в последнем случае очевидно.

Для соблюдения равнозначности условий протекания указанного процесса, пропитка осуществлялась аналогично [112] путем заполнения автоклава лаком одинаковой вязкости (20 с) без дополнительных внешних воздействий.

Анализ результатов, приведенных на рисунке 3.7, показал, что при скоростной вакуумной сушке ее длительность сокращается с 1,5 – 5 ч до 20 мин и менее. Это подтвердило ранее полученные автором результаты [112]. За критерий продолжительности сушки аналогично [112] было взято время стабилизации нарастания сопротивления витковой изоляции. При этом кривые *1*, *2* и *3* построены, соответственно, для скоростной вакуумной, вакуумной со временем создания вакуума в автоклаве более полуминуты и конвективной сушки.

Экспериментальная проверка ранее выдвинутого предположения о том, что применение скоростного вакуумирования обмоток перед пропиткой позволяет значительно снизить температуру предварительного нагрева до 50 – 70 °С с получением более высоких значений показателей качества сушки, в частности, сопротивления изоляции и количественных показателей удаляемой влаги, подтвердила его правомерность [378]. Согласно результатам исследований, в период прогрева в течение 10 – 15 мин за счет конвекции удается удалить до 10 % исходного количества влаги, в следующий период – до 30 – 40 % влаги за 1,5 – 2 ч. В то же время, вакуумная сушка обеспечивает 65 – 70 % удаления влаги за 20 – 30 мин вакуумирования. Скоростная вакуумная

сушка до пропитки увлажненных обмоток за 10 – 15 с позволяет извлечь до 95 % влаги.

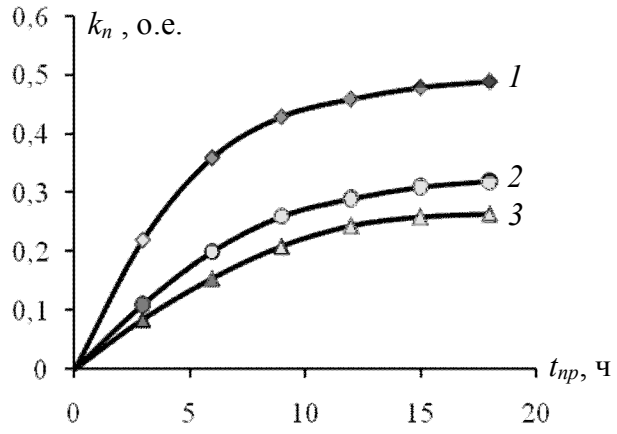


Рисунок 3.6 – График зависимости коэффициента пропитки от времени пропитки и способа предварительной сушки: *1* – скоростная вакуумная; *2* – вакуумная в установке АВБ; *3* – конвективная

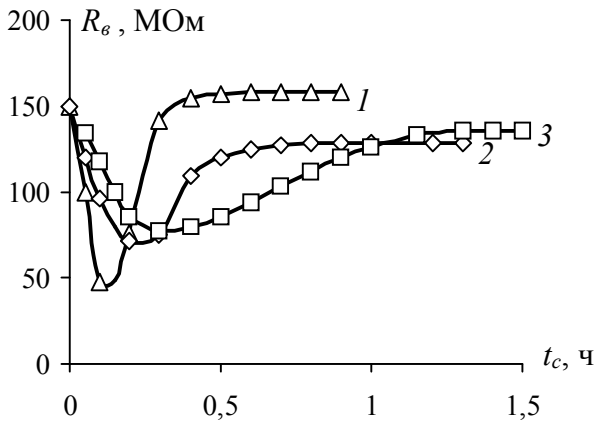


Рисунок 3.7 – График зависимости сопротивления витковой изоляции от времени и способа предварительной сушки: *1* – скоростная вакуумная; *2* – вакуумная;
3 – конвективная

Экспериментальными исследованиями по ранее предложенной автором методике [112] также было установлено, что для многовитковых обмоток с большой плотностью укладки и большим коэффициентом заполнения паза целесообразно выполнять циклическое вакуумирование, которое сопровождается интенсификацией извлечения влаги из наиболее глубоких слоев. Согласно рисунку 3.8, уже за два цикла воздействия витковое сопротивление стабилизируется за время не более 7 мин.

Целью следующего этапа процесса восстановления электрической изоляции после предварительного прогрева и сушки является достижение наиболее полного и однородного насыщения капиллярно-пористого тела обмотки лаковой основой, при котором коэффициент пропитки, характеризующий насыщение обмотки, достигал бы своих наивысших значений.

По методике, приведенной в [144, 379], была выполнена серия экспериментов, в которых статорные обмотки пропитывались скоростным вакуумным методом (СВМ), с помощью медленного набора вакуума, путем наложения постоянного и переменного электрических полей, погружением в лак. В качестве критерия эффективности пропитки принималась динамика и прирост емкости пропитываемого образца в ходе пропитки [144]. На рисунке 3.9 приведены результаты выполненных исследований после 20-кратной повторяемости опытов. Очевидно, что применение вакуума в скоростном режиме его набора дает наибольший прирост емкости ΔC и наименьшее время выхода ее на установившееся значение.

Кроме использования ΔC, качество пропитки определялось достигнутой влагостойкостью и электрической прочностью изоляции. Установлено, что влагопоглощение и его скорость существенно снижаются (до 40 раз) при переходе от традиционных способов пропитки к вакуумно-нагнетательному (ВНМ) и скоростному вакуумному методам с повышением абсолютных значений напряжений пробоя корпусной и витковой изоляции в процессе увлажнения (рисунок 3.10).

Исследования распределения значений напряжения пробоя витковой и корпусной изоляции для различных способов пропитки показали, что использование СВМ пропитки обмоток позволяет увеличить напряжение пробоя корпусной и витковой изоляции в 1,5 – 2 раза и в 2 – 2,5 раза – высушенной изоляции после ее увлажнения в среде с 90 – 98 % влажностью.

Следует отметить еще один немаловажный факт. Он связан с тем, что получение высоких значений показателей качества пропитки еще не означает глубокого объемного проникновения пропиточного состава в обмотку. Это относится, например, к многократным пропиткам методом окунания. Формирование толстых слоев лака в лобовых частях не только затрудняет их быстрое просыхание, но и значительно замедляет проникновение лака в пазовую часть, хотя и обеспечивает привес лака.

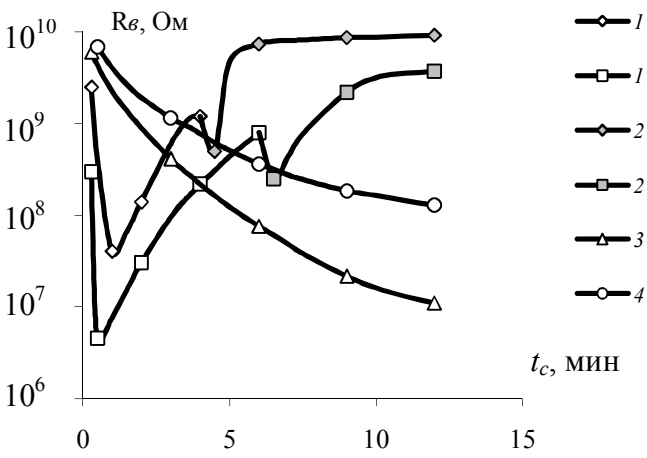


Рисунок 3.8 – Кривые изменения сопротивления витковой изоляции: *1*, *1′* – изменение $R_в$ в первом цикле после предварительной выдержки в среде с 60 % и 80 % влажностью; *2*, *2′* – изменение виткового сопротивления во втором цикле; *3*, *4* – изменение сопротивления при конвективной и вакуумной сушке

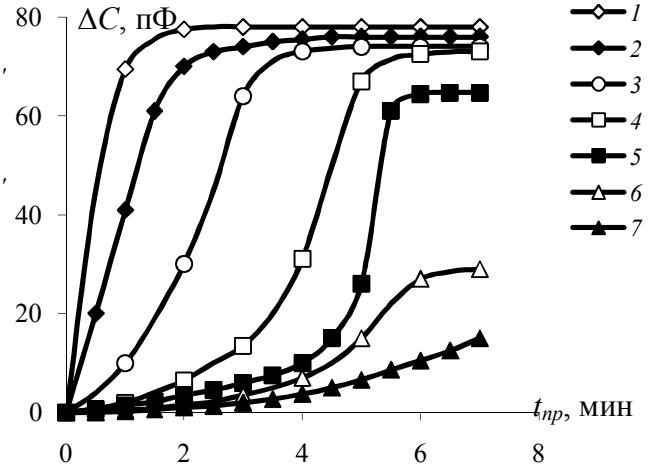


Рисунок 3.9 – График зависимости качества и скорости пропитки от способа ее выполнения: *1*, *2* – скоростным вакуумированием; *3* – вакуумно-нагнетательным способом; *4*, *5* – наложением переменного и постоянного электрического поля; *6*, *7* – горячим и холодным окунанием

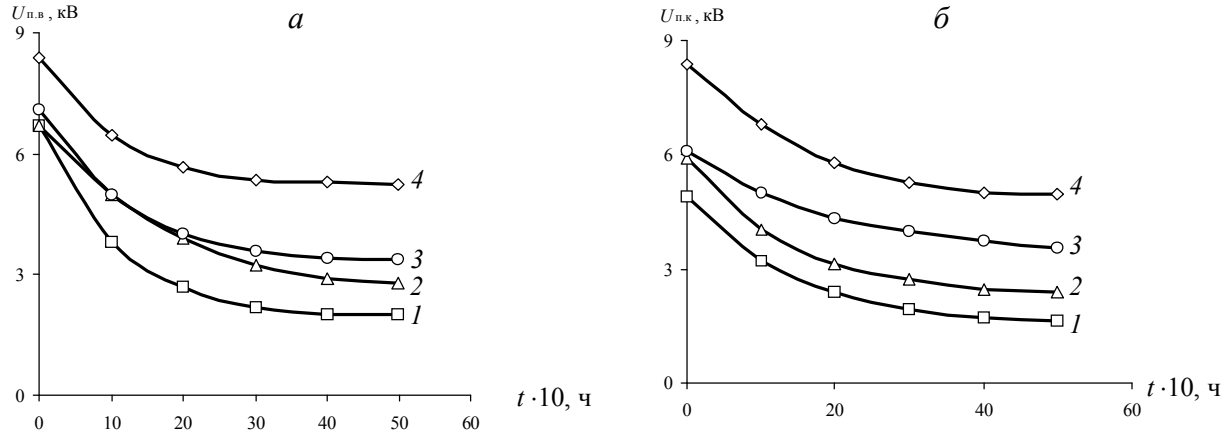


Рисунок 3.10 – График зависимости пробивного напряжения витковой (*а*) и корпусной (*б*) изоляции от времени пребывания в среде с 98 %-й влажностью при различных способах пропитки обмоток: *1* – однократным окунанием; *2* – двукратным окунанием; *3* – вакуумная на АВБ; *4* – скоростная вакуумная при скорости изменения давления 12 с

Сквозного проникновения пропиточного состава в тело обмотки электрического двигателя удалось добиться лишь с помощью СВМ (рисунок 3.11). Чтобы получить аналогичные результаты, осуществляя пропитку ВНМ путем чередования вакуума и повышенного давления, потребовалась двойная пропитка с временем вакуумирования не менее 15 – 20 мин в каждом цикле с последующей сушкой.

Полученные экспериментальным путем обобщенные кривые зависимости глубины проникновения лака в обмотку от времени для различных методов пропитки (рисунок 3.12) позволили установить, что скоростной вакуумный способ за счет больших градиентов давления обеспечивает глубокую пропитку лаками с большой вязкостью, создавая условия для высокой сохранности лака в обмотке после пропитки при практически сквозном его проникновении на всю длину и глубину паза. При этом коэффициент заполнения паза $k_{з.п}$ в незначительной степени по сравнению с применяемыми способами влияет на h. В то же время, наибольший привес лака и глубина его проникновения могут быть получены традиционными методами только при низких значениях вязкости лака, но при стекании лака после пропитки значительная его часть (до 50 %) в силу отмеченного обстоятельства вытекает из обмотки.

Наиболее длительным и энергоемким процессом во всей рассматриваемой технологической цепочке является сушка обмоток электродвигателей после пропитки, протекающая в два этапа.

В рамках выбранной нами последовательности выполнения технологических операций, на очередном этапе из лака удаляется растворитель, на следующем – происходит полимеризация (запекание) лаковой пленки.

Продолжительность третьего и четвертого этапов рассматриваемого процесса, аналогично первому, зависит от габаритов изделий, свойств пропиточного лака, а также от температуры, времени и способа сушки [154, 157].

Суммарное время сушки, включая период предварительного прогрева, для большинства лаков достигает одних суток [33, 142]. Уменьшения времени сушки по-прежнему можно добиться путем увеличения температуры нагрева с сохранением всех тех последствий, о которых упоминалось выше. Задачу сокращения длительности протекания указанного процесса не решает и использование установок АВБ. Даже при однократной пропитке продолжительность всего технологического процесса превышает 12 ч.

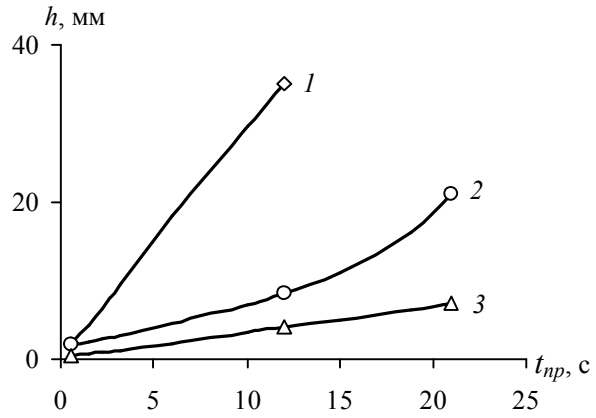


Рисунок 3.11 – График зависимости глубины проникновения лака МЛ-92 от времени и способа пропитки: *1* – пропитка СВМ для $p_{ост}$ = 120 мм рт. ст.; *2* – пропитка ВНМ; *3* – пропитка окунанием

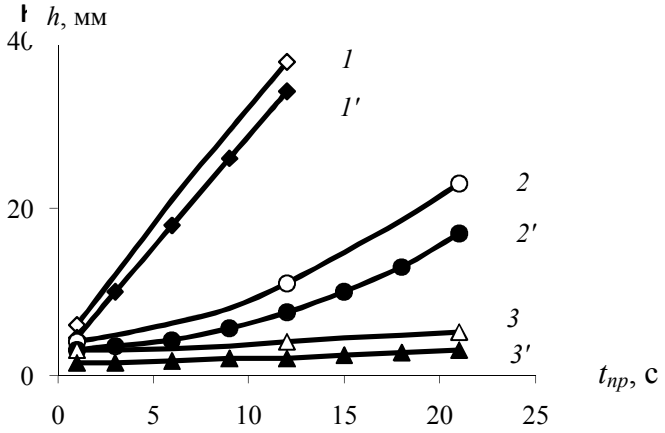


Рисунок 3.12 – Зависимость глубины проникновения лака от коэффициента заполнения паза и способа пропитки: *1*, *1′* – пропитка СВМ ($k_{з.п.}$= 60 и 80 % соответственно); *2*, *2′* – пропитка ВНМ (60 и 80 %); *3*, *3′* – пропитка окунанием (60 и 80 %)

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что качество двигателей, пропитанных скоростным вакуумным методом, значительно выше и лишь в одном случае совпадает с качеством, которого удается достичь, например, двукратной пропиткой по принятой на ОАО «Сибэлектромотор» технологии [278].

3.2.2 Результаты экспериментальных исследований процессов пропитки и сушки скоростным термовакуумным методом

Успешные решения поставленных задач по сокращению длительности процессов переноса теплоты и массы в теле обмоток электрических двигателей, снижению энергетических затрат, повышению качества изделий были получены путем выбора и обоснования рациональных режимов скоростной вакуумной пропитки и сушки на установке, показанной на рисунке 3.5 [380].

Приведенные на рисунке 3.13 кривые иллюстрируют влияние режимов скоростной вакуумной сушки на ее качество. Из полученных графических зависимостей видно, что повышение температуры сушки и глубины вакуума приводит к сокращению времени восстановления виткового сопротивления обмотки при постоянном времени вакуумирования.

На рисунках 3.14 – 3.16 изображены экспериментальные зависимости величины насыщения лаковой основой обмоток $\omega_л$ от глубины вакуума и скорости вакуумирования для различных лаков и различной их вязкости.

Исследования показали, что выбор оптимальной вязкости в рассматриваемом случае играет важную роль, т. к. при низких значениях вязкости (20 – 25 с) можно добиться сквозного проникновения лака в обмотку, но, вместе с тем, не предотвратить последующее его вытекание. Чрезмерное же увеличение вязкости лака (более 80 с) затрудняет его проникновение в обмотку, особенно с большой плотностью укладки проводников.

Удовлетворительные результаты, полученные в ходе экспериментов, позволяют утверждать, что пропитка лаками с большой вязкостью с использованием СВМ обеспечивает требуемое качество восстановления изоляции (высокие коэффициенты пропитки), создавая высокую степень сохранности лака в обмотке после пропитки.

Пространственные зависимости степени насыщения обмоток лаком от режимов СВМ, которые позволяют для различных лаков выбирать наиболее рациональный режим пропитки, где максимальному насыщению $\omega_л = 12$ г соответствует коэффициент пропитки $k_п = 1$, приведены на рисунках 3.17 и 3.18.

Температура обмоток по завершении их пропитки и удаления лака из автоклава с отсосом его излишков с поверхности пакетов повышалась путем прогрева автоклава до 80 – 90 °С, после чего они подвергались скоростному вакуумированию в циклическом режиме с чередованием вакуума и атмосферного давления. Количество циклов выбиралось в зависимости от габаритов изделий и свойств пропиточного лака и, как правило, не превышало четырех – пяти.

Заметим, что в процессе вакуумирования температура обмоток падала на 5 – 10 °С. Это обстоятельство требовало перед очередным циклом вновь поднимать температуру до 80 – 90 °С. После циклического воздействия вакуума для полимеризации лака температура обмоток повышалась до 120 – 140 °С на 35 – 40 минут. Для интенсификации данного процесса через автоклав циклами с помощью вакуума глубиной 150 – 200 мм рт. ст. прокачивался воздух, т. к. большинство лаков высыхает за счет термоокислительных процессов. При этом стабилизация значений корпусной и витковой изоляции для лаков МЛ-92 и БТ-987 достигалась уже после первого цикла, а для лака ПЭ-933 – после второго.

В свою очередь, анализ существующих методов диагностики обмоток ЭД, выполненный во втором разделе монографии, позволил предложить для

использования в роли обобщающего показателя качества изоляции обобщенный диагностический параметр Ψ. Эта величина может быть получена при использовании метода волновых затухающих колебаний в обмотке, разработанного для исследований по диагностике и прогнозированию состояния электродвигателей в процессе эксплуатации и ремонта.

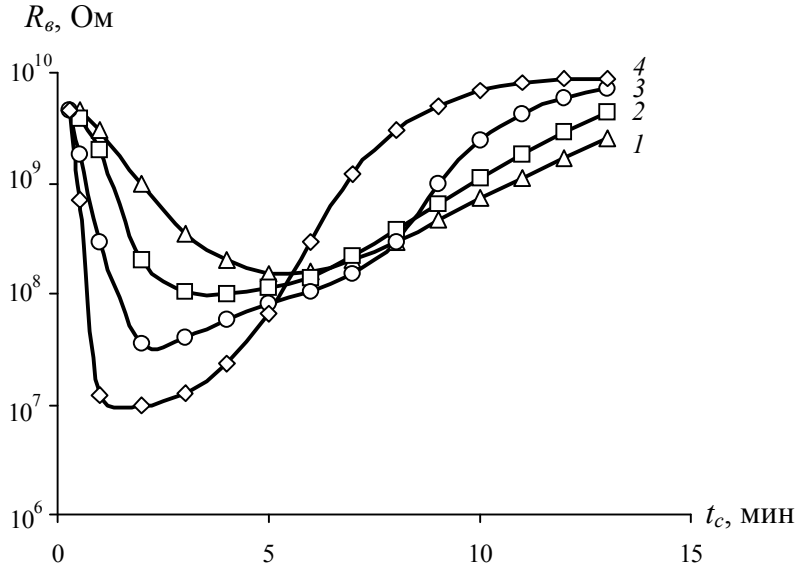


Рисунок 3.13 – Кривые сушки для различных режимов СВМ ($t_в$ = 12 с): *1* – T = 80°С; p = 0,2 атм; *2* – T = 80°С, p = 0,1 атм; *3* – T = 100°С, p = 0,1 атм; *4* – T = 100°С, p = 0,02 атм.

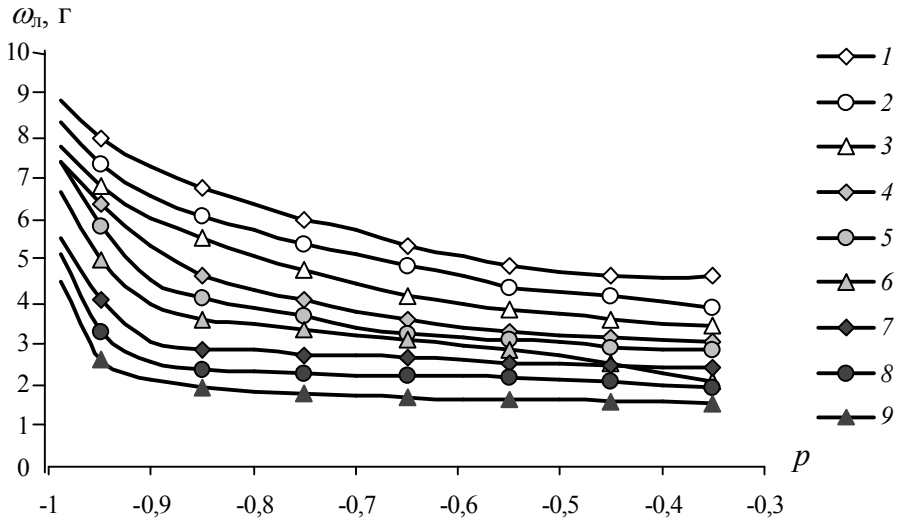


Рисунок 3.14 – Зависимость насыщения лаком обмоток для различных режимов СВМ: *1*, *4*, *7* – лак КО-964 (80, 30 и 60 °С); *2*, *5*, *8* – лак ФЛ-98 (80, 30 и 60 °С); *3*, *6*, *9* – лак ПЭ-993 (80, 30 и 60 °С)

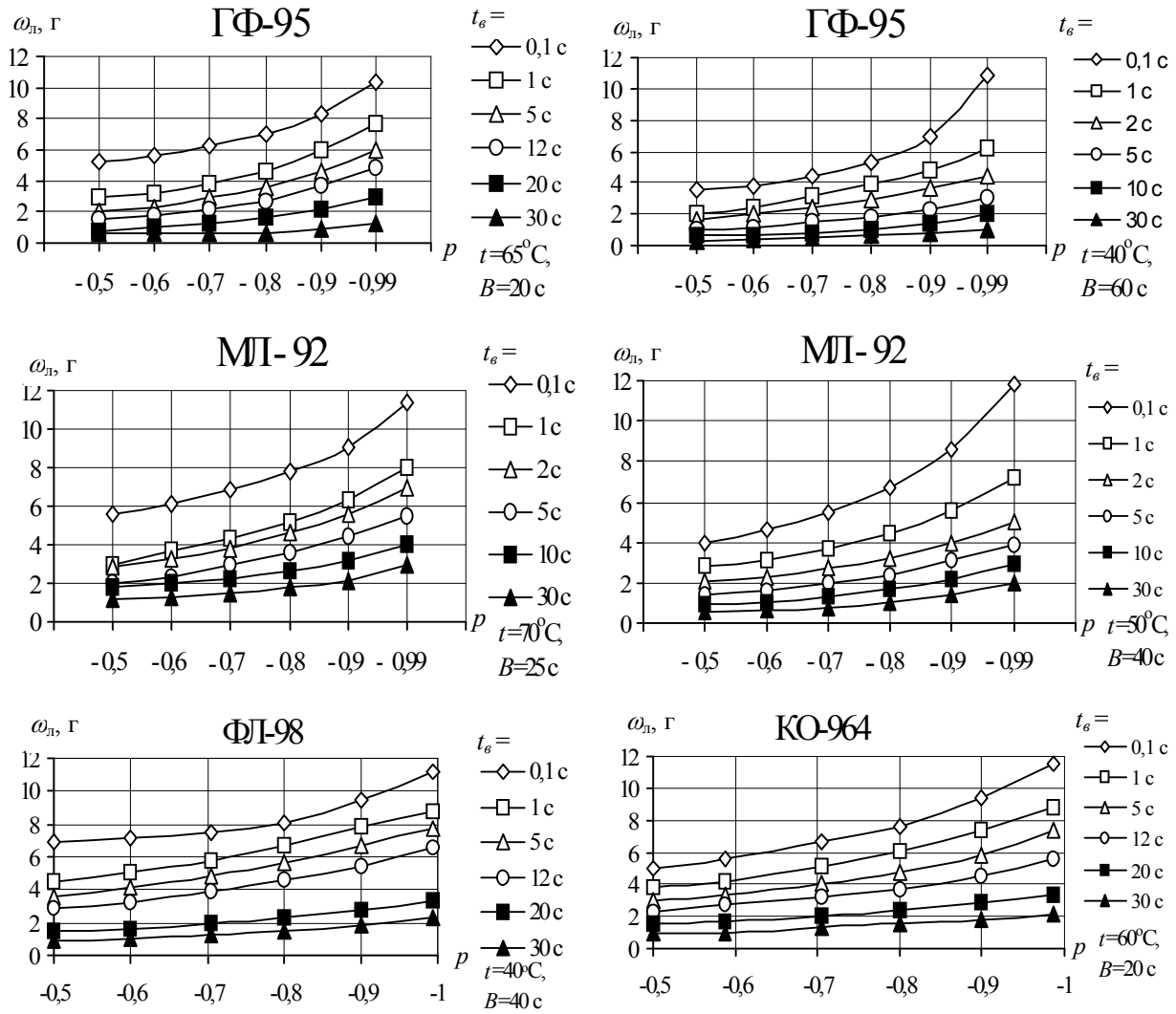


Рисунок 3.15 – Зависимость насыщения обмоток лаком от режимов пропитки СВМ

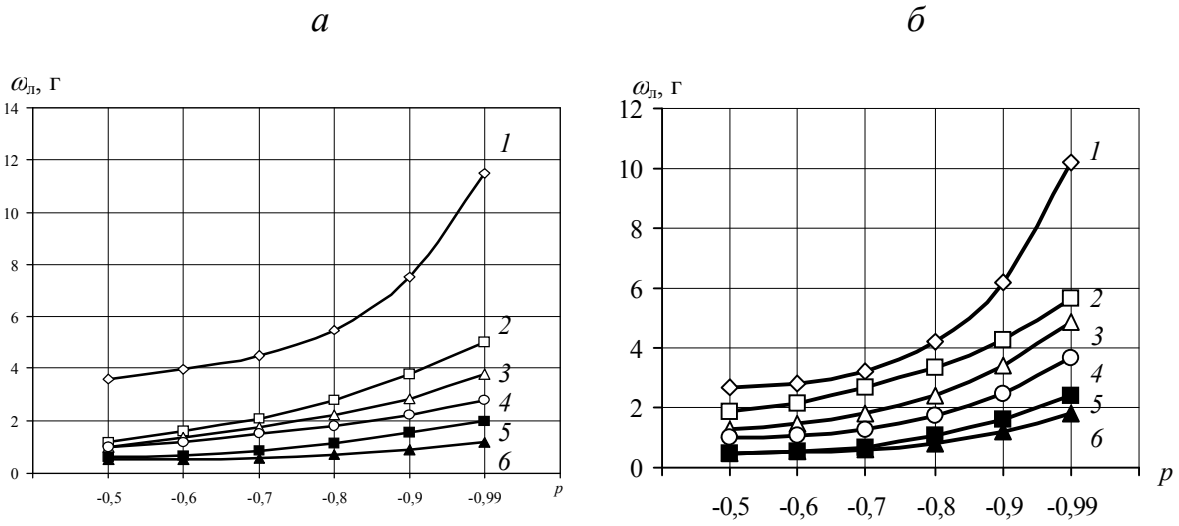


Рисунок 3.16 – Зависимость насыщения лаком обмоток от режимов пропитки СВМ: *а* – лак ПЭ-933, В = 65 с; *б* – лак КО-916к, В = 90 с;
1 – $t_в$ = 0,1 с; *2* – $t_в$ = 1 с; *3* – $t_в$ = 5 с; *4* – $t_в$ = 12 с; *5* – $t_в$ = 20 с; *6* – $t_в$ = 30 с

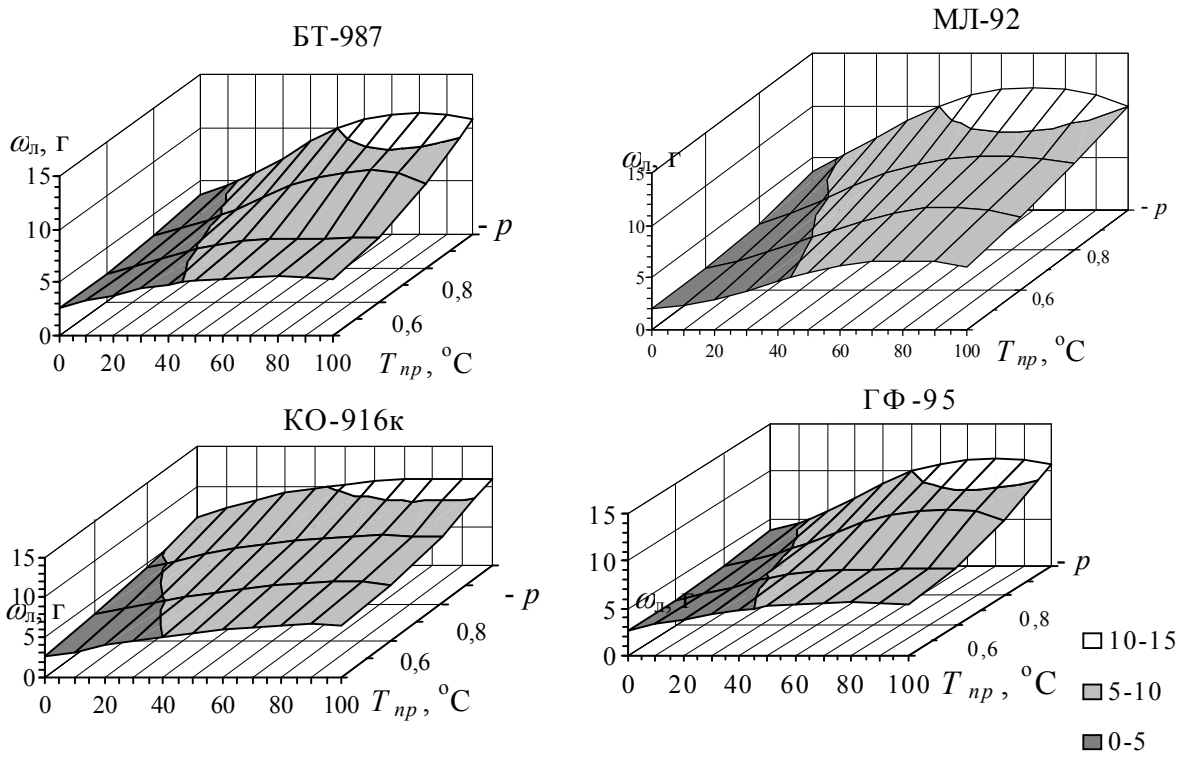


Рисунок 3.17 – Выбор рационального режима пропитки обмотки для лаков БТ-987, ГФ-95, МЛ-92, КО-916к при скоростном наборе вакуума

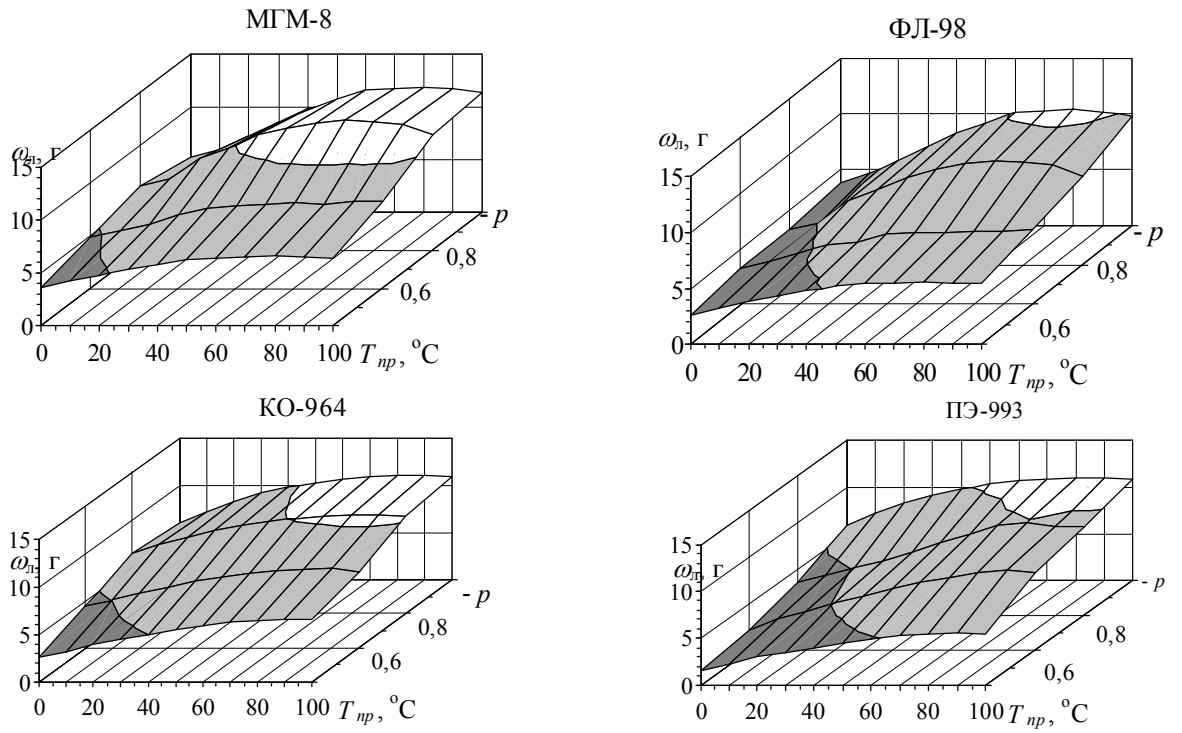


Рисунок 3.18 – Выбор рационального режима пропитки обмоток для лаков МГМ-8, ФЛ-98, КО-964, ПЭ-993 при скоростном наборе вакуума

3.2.3 Динамика изменения обобщенного диагностического параметра при восстановлении изоляции электрических двигателей

Как было доказано, обобщенный диагностический параметр наиболее полно характеризует протекающий в обмотке электродвигателя затухающий колебательный процесс при подаче на нее импульса прямоугольной формы и может использоваться для оценки состояния изоляции на всех этапах технологического процесса ремонта; является универсальным и заменяет группу частных показателей качества [1, 278].

В ходе исследований проведен ряд экспериментов по определению величины обобщенного диагностического параметра Ψ после каждого из этапов технологического процесса восстановления изоляции асинхронных электродвигателей мощностью 1,1 кВт. Результаты исследований представлены на рисунке 3.19. Установлено, что величина рассматриваемого диагностического параметра от одного технологического этапа к другому возрастает, что свидетельствует об увеличении диэлектрических свойств изоляции в процессе ее восстановления СВМ. Данные зависимости представляют собой статистическую основу для нахождения оптимального варианта протекания указанного процесса.

Исследование динамики изменения величины ОДП проводилось для всех характерных этапов процесса пропитки и сушки изоляции ЭД и наиболее распространенных методов, использующихся на этих этапах. Полученные кривые сушки до пропитки, пропитки, сушки после пропитки (рисунки 3.20 – 3.22) имеют важнейшее значение для задания временных границ при оптимизации режимов работы любой технологической установки. Это требование отражает необходимость учитывать физико-химические изменения, происходящие во время технологического процесса [381, 382].

Кривые нагрева статоров перед пропиткой (рисунок 3.20) характеризуют лишь температурную зависимость Ψ. При этом никаких структурных изменений в изоляции ЭД не происходит. Значение Ψ определяется исключительно разностью температур, до которой нагревается статор. Вид кривых зависит только от скорости нагрева изделия. Для кривой *3* отмечено незначительное увеличение величины ОДП при скоростном вакуумном воздействии вследствие изменения свойств рассматриваемой конструкции за счет удаления воздуха [1, 15].

На начальном этапе сушки изоляции (во время нагрева статора) одновременно протекают два процесса: ее нагрев и незначительное удаление влаги. Вследствие этого значение Ψ для начального участка кривых *2* и *4* несколько больше, чем у кривых *1* и *3*. При конвекционной сушке в дальнейшем происходит равномерное удаление влаги из изоляции, в связи с чем значение Ψ кривой *2* равномерно возрастает.

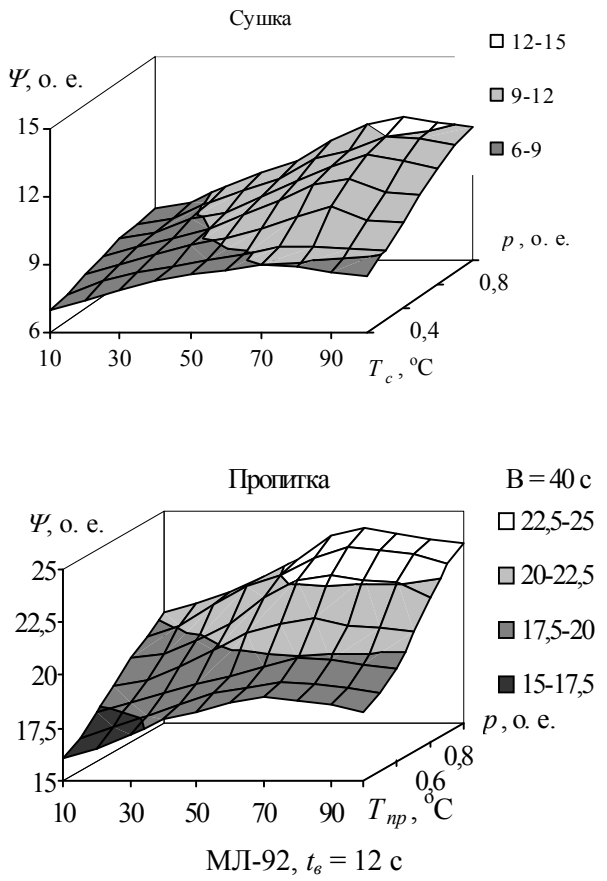


Рисунок 3.19 – Значения диагностического параметра для различных режимов сушки и пропитки скоростным вакуумным методом

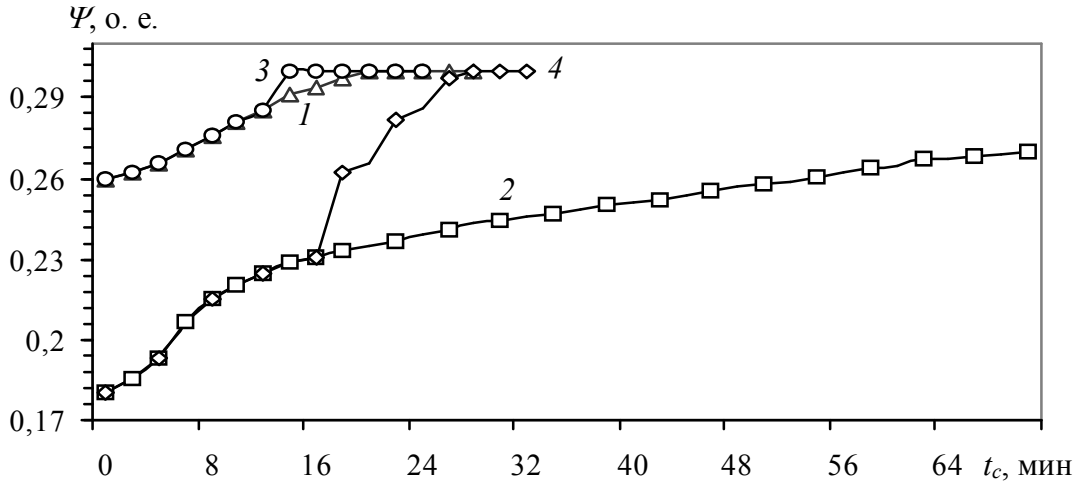


Рисунок 3.20 – Кривые изменения Ψ в ходе сушки изоляции перед пропиткой: *1*, *2* – нагрев; *3*, *4* – сушка перед пропиткой по конвекционному методу и СВМ

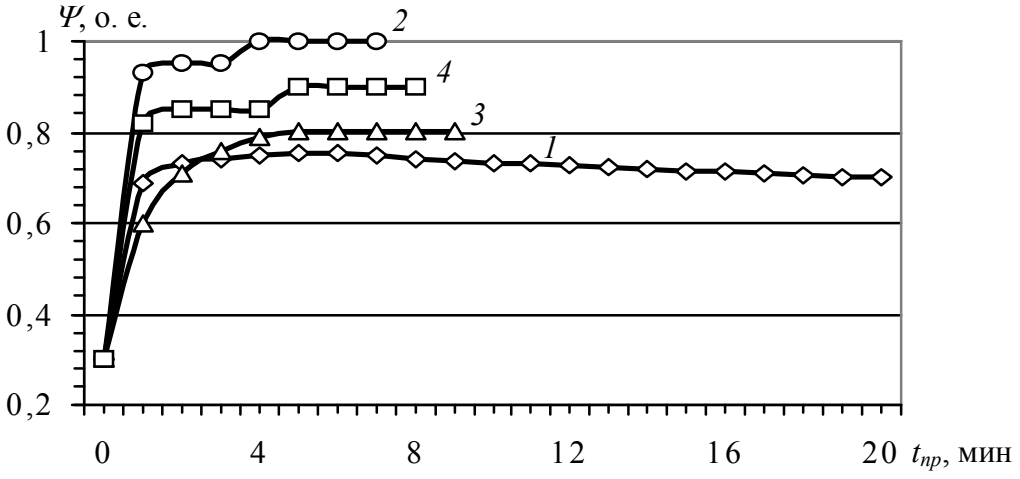


Рисунок 3.21 – Кривые изменения *Ψ* в ходе пропитки: *1* – погружением; *2* – СВМ; *3* – капельная; *4* – по вакуумно-нагнетательному методу

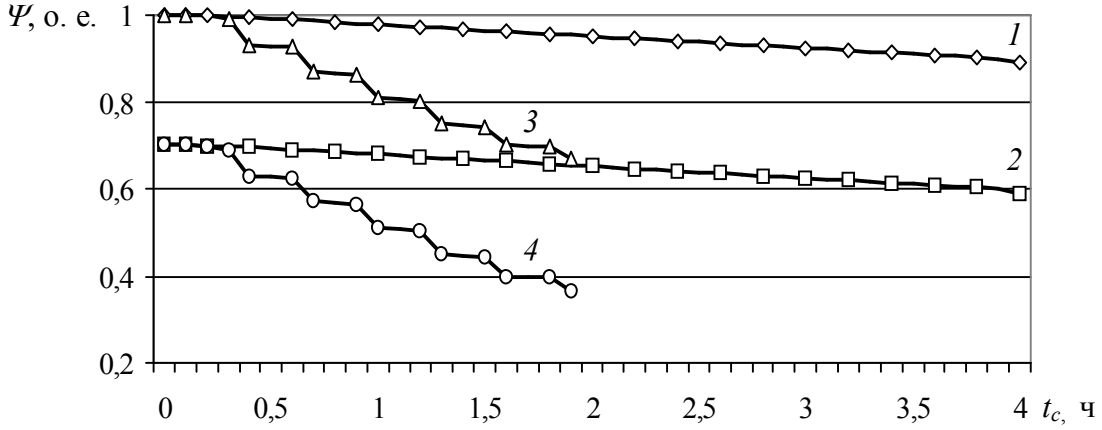


Рисунок 3.22 – Кривые зависимости *Ψ* от времени при сушке после пропитки: *1* – по конвекционному методу после пропитки СВМ; *2* – по конвекционному методу после пропитки погружением; *3* – по скоростному электротермовакуумному методу после пропитки СВМ; *4* – по скоростному электротермовакуумному методу после пропитки погружением

Для сушки по скоростному электротермовакуумному методу характерно циклическое удаление влаги. Поэтому кривая *4* имеет скачки вверх в те моменты времени, когда производится вакуумный удар. При этом процесс протекает наиболее интенсивно, чем и вызвано такое резкое изменение значения ОДП.

При пропитке погружением, по вакуумному и скоростному вакуумному методам на первом этапе наблюдается интенсивный процесс заполнения обмотки пропиточным составом, в связи с чем значение *Ψ* резко увеличивается. В дальнейшем значение *Ψ* в течение некоторого времени растет незначительно и стабилизируется.

Величина скорости увеличения численного значения *Ψ* для пропитки погружением определяется быстротой погружения обрабатываемых статоров в емкость с пропиточным составом, температурой обмотки и вязкостью лака.

Аналогичную зависимость имеют и кривые *2* и *4*. Для вакуумно-нагнетательного и скоростного электротермовакуумного методов вместо быстроты погружения изделия в лак решающее значение имеет скорость заполнения автоклава пропиточным составом, которая, в свою очередь, зависит от имеющейся разности давлений. В отличие от скоростного электротермовакуумного метода пропитки, где автоклав заполняется сравнительно быстро, в случае вакуумной пропитки (кривая *4*) разность давлений между автоклавом и емкостью с лаком создается постепенно, и процесс заполнения автоклава пропиточным составом протекает дольше. Дополнительные вакуумные удары позволяют ненамного повысить значение Ψ. При извлечении пропитываемой обмотки из пропиточной ванны лак начинает стекать, что несколько уменьшает значение Ψ. При пропитке с использованием вакуумно-нагнетательного и скоростного электротермовакуумного методов снижения значения Ψ практически не наблюдается.

Сушка после пропитки по конвекционному методу занимает значительное время, поэтому на рисунке 3.22 кривые *1* и *3* приведены не полностью. Процесс сушки при скоростном электротермовакуумном методе протекает более интенсивно. Наличие скачкообразных изменений значений Ψ в сторону объясняется резким удалением паров растворителей из тела обмотки при вакуумных ударах. На остальных участках происходит сравнительно плавное изменение Ψ. При конвекционной сушке после пропитки значение Ψ уменьшается постепенно, что свидетельствует об отсутствии каких-либо значительных изменений в ходе процесса. Аналогичная тенденция наблюдается и при сушке по тóковому и терморадиационному методам.

Обращает на себя внимание тот факт, что при сушке как по скоростному вакуумному, так и по конвекционному методам, изменение Ψ различается мало, т. е. качество всего технологического процесса целиком и полностью определяется качеством пропитки при условии завершенности процесса сушки до и после пропитки.

Существенным результатом проведения данной группы экспериментов стало получение условий, позволяющих сформировать ограничения множества возможных значений технологических параметров, которые вводятся с целью уменьшения или полной ликвидации негативного воздействия температуры при сушке на изоляционную систему. Кроме того, немаловажной является проблема определения момента времени, когда процесс тепломассопереноса в обмотке заканчивается: при сушке до пропитки влага удаляется, при пропитке – прекращается перемещение пропитывающего состава, а при сушке после пропитки – завершается полимеризация молекул лака. Таким образом, ограничения налагаются на значения времени пропитки или сушки. При этом справедливы соотношения:

$$\left|Ш - Ш_{зад}\right| \le e; \qquad (3.101)$$

$$\left|Ш - Ш_{зад}\right| \ge к, \qquad (3.102)$$

где $\Psi_{зад}$ – заданное значение Ψ для данного метода пропитки или сушки, при котором процесс можно считать завершившимся; ε – допустимая степень различия значений $\Psi_{зад}$ и Ψ, по достижении которой процесс считается завершившимся; κ – минимальное значение разности $\Psi_{зад}$ и Ψ, при которой протекающий процесс можно условно считать завершившимся.

Выражение (3.101) определяет условие максимальной длительности процесса, а (3.102) – минимальной. Для повышения достоверности получаемого результата при использовании выражений (3.101) и (3.102) в ходе исследования динамики изменения Ψ в процессе восстановления изоляции ЭД проведены эксперименты с целью установления зависимости значения Ψ от температуры. Анализ результатов экспериментов показал, что такая зависимость в диапазоне от 20 до 100 °С, для которых проводились исследования, имеет линейный характер. В общем случае зависимость ОДП от температуры представлена во втором разделе монографии.

Таким образом, полученные кривые изменения величины Ψ в ходе восстановительных мероприятий позволили задавать временные границы при оптимизации режимов работы любой технологической установки.

3.2.4 Анализ режимов функционирования технологических установок по пропитке и сушке изоляции электродвигателей

Для исследования режимов функционирования любой технологической установки особенно актуально использование теории планирования экспериментов. Вызвано это чрезвычайно большим количеством возможных режимов работы установок и необходимостью сокращения числа опытов без потери ценной информации.

Прежде чем был выбран план проведения экспериментальных исследований, были проведены отсеивающие эксперименты, назначением которых является выявление набора наиболее значимых факторов и исключение из дальнейшего рассмотрения малозначимых. При исследовании зависимости значений $\overline{Ш}$от параметров технологического процесса отсеивание малозначимых факторов осуществлялось в два этапа. На первом этапе по составленной матрице с использованием метода случайного баланса проведена серия экспериментов [383]. На втором – проводился корреляционный анализ результатов этой серии экспериментов по методике, изложенной в [384], результатом которого стало установление перечня воздействующих факторов для различных методов сушки и пропитки. Методы сушки описываются следующими параметрами технологического процесса: конвекционный метод – температура сушки T_c, продолжительность сушки t_c, скорость воздушного потока v; индукционный – T_c, t_c; токовый – T_c, t_c; вакуумный – глубина вакуума p, время создания вакуума $t_в$, T_c, количество циклов вакуумирования $N_{в.у}$; скоростной электротермовакуммный – p, $t_в$, T_c, t_c, $N_{в.у}$. Методы пропитки целесообразно характеризовать с помощью следующих параметров: погру-

жением – продолжительность пропитки $t_{пр}$, температура пропитки $T_{пр}$; капельную пропитку – $t_{пр}$, $T_{пр}$, угол наклона α; вакуумно-нагнетательный метод – $T_{пр}$, p, $t_в$, $N_{в.у}$, величина избыточного давления $p_{изб}$; скоростной электротермовакуумный метод – $t_{пр}$, $T_{пр}$, p, $t_в$, $N_{в.у}$.

Анализ существующих планов [385 – 387] позволил выбрать для проведения экспериментов несимметричные факторные планы с числом уровней варьирования факторов от 3 до 5. Выбор обусловлен тем, что процессы, протекающие на каждом из этапов восстановления изоляции, являются сложными, в связи с чем необходимо увеличить количество уровней варьирования факторов. Об этом же свидетельствует и тот факт, что при уменьшении уровней варьирования факторов возможна полная потеря информации о наличии ярко выраженного экстремума функции, лежащего между удаленными точками поверхности отклика. В конце концов при снижении количества уровней варьирования факторов уменьшается точность модели, описывающей процесс, что нежелательно при проведении оптимизационных исследований [382, 388].

Исследования режимов работы технологических установок проводились как в реальных условиях на действующих предприятиях, так и в лабораторных условиях [389]. Для сушки до пропитки использовались ЭД серии 4А высот вращения 60 – 112 мм, обмотка которых подверглась капитальному ремонту. В дальнейшем эти двигатели увлажнялись до тех пор, пока значение $\overline{Ш}$не уменьшалось на 20 %. После этого электродвигатели подвергались сушке на различных технологических установках в соответствии с выбранным планом эксперимента. В результате проведения опытов для различных методов сушки получены графические зависимости, представленные на рисунке 3.23. Анализируя их, можно заключить, что основным параметром, обусловливающим ту или иную интенсивность протекания процесса сушки, является температура обмотки. Если сравнить получаемое качество при конвекционной и токовой сушке, то можно прийти к выводу, что при одинаковом времени сушки при фиксированной температуре токовая сушка более эффективна, чем конвекционная. Объясняется это тем, что на начальном этапе при токовой сушке происходит быстрый разогрев обмотки, что вызывает скорейшее начало процесса удаления влаги из обмотки. В дальнейшем за счет теплопереноса нагреваются другие части двигателя и окружающий двигатель воздух. При конвекционной сушке наблюдается обратная картина: сперва нагревается воздух, а уже потом равномерно прогревается двигатель. При этом температура обрабатываемого ЭД не может быть выше температуры воздуха, с помощью которого осуществляется перенос тепла.

Описываемые графики для скоростной электротермовакуумной и вакуумной технологий построены для условия осуществления трех циклов изменения давления от атмосферного до вакуума и наоборот. Необходимо отметить, что помимо повышения температуры интенсификацию процесса сушки обеспечивает увеличение глубины вакуума. В результате сравнения эффективности этих технологий сушки можно констатировать, что лучшее качество за меньшее

время достигается при использовании скоростной электротермовакуумной технологии. Это вызвано большей скоростью создания вакуума, что обеспечивает интенсивное вытеснение влаги из обмотки.

Исследование режимов пропитки обмоток электродвигателей проводилось для сортамента статоров, приведенного выше. При этом для обеспечения условия сравнимости результатов экспериментов перед пропиткой обеспечивалось полное удаление влаги из обмотки, следствием чего явилось равенство значений $\overline{Ш}$перед пропиткой. На рисунках 3.24 – 3.25 представлены графики пропитки обмоток электродвигателей серии 4А при использовании различных методов пропитки. Для пропитки по вакуумно-нагнетательному и скоростному электротермовакуумному методам значения $\overline{Ш}$приведены после двух циклов изменения давления от атмосферного до вакуума заданной глубины и вновь до атмосферного. Анализируя графики пропитки, можно прийти к выводу, что температура воздействует на интенсивность протекающего процесса, но не всегда ее влияние однообразно. При капельной пропитке повышение температуры обусловливает увеличение значения $\overline{Ш}$при прочих равных условиях.

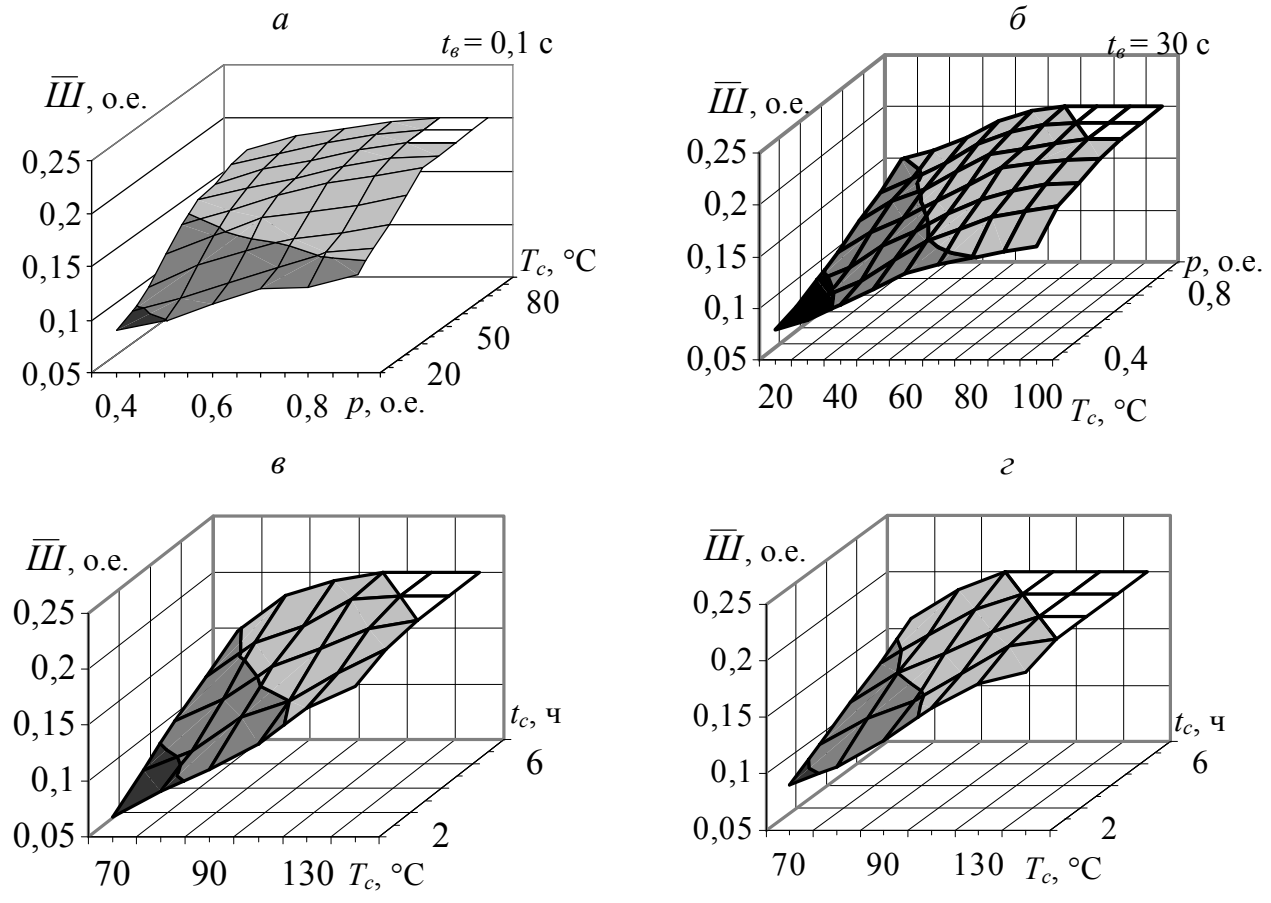


Рисунок 3.23 – Графики зависимости $\overline{Ш}$от параметров процесса сушки до пропитки по скоростному электротермовакуумному (*а*), вакуумному (*б*), конвекционному (*в*) и токовому (*г*) методам

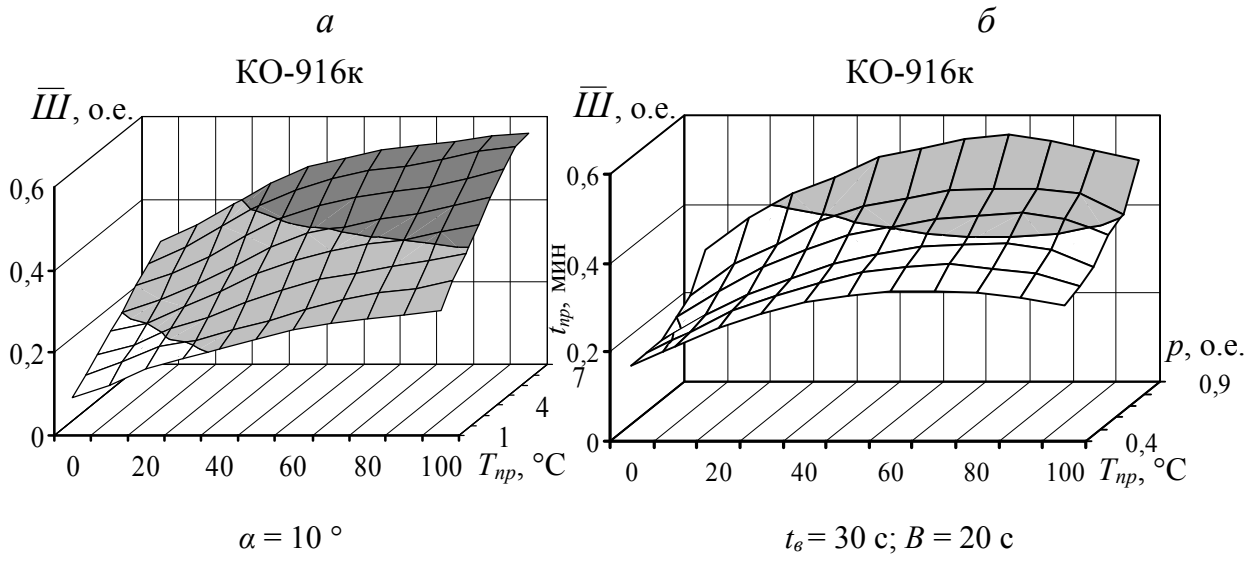


Рисунок 3.24 – Графики зависимости $\overline{Ш}$от параметров процесса капельной пропитки (*а*) и пропитки вакуумным (*б*) методом

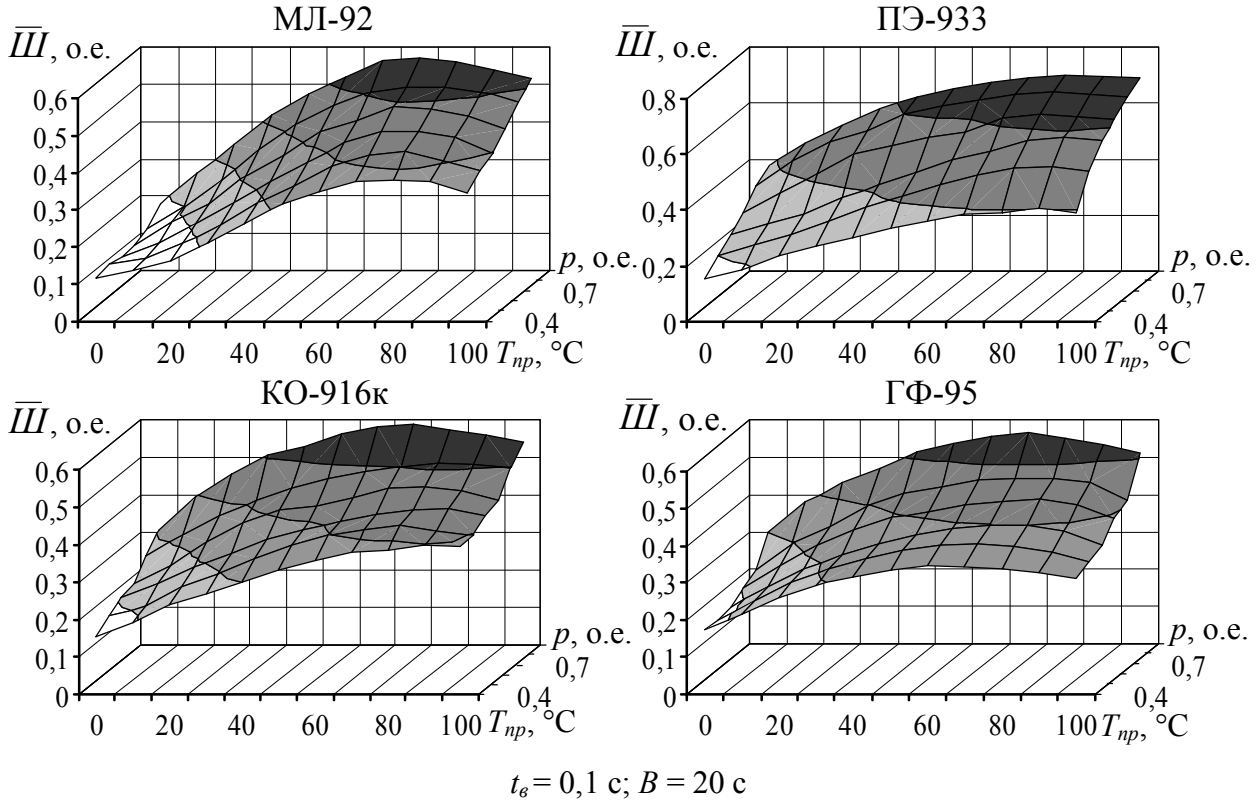


Рисунок 3.25 – Графики зависимости ОДП от параметров процесса пропитки изоляции скоростным вакуумным методом

При вакуумно-нагнетательной пропитке и пропитке по скоростному электротермовакуумному методу воздействие температуры носит несколько иной характер: при росте температуры значение $\overline{Ш}$ увеличивается, а после достижения температурой некоторого значения начинает несколько снижаться. Наиболее вероятной причиной этого может служить совокупное воздействие на лак температуры и резких перепадов давления, следствием которого является частичное удаление летучих компонентов пропиточного состава, в результате чего происходит повышение вязкости лака. В ходе процесса пропитки из-за повышенной вязкости пропиточный состав не может за короткое время полностью заполнить тело обмотки. Влияние на процесс пропитки по скоростному электротермовакуумному методу величины создаваемого вакуума также неоднозначно: при постепенном возрастании перепада давлений наблюдается рост значения $\overline{Ш}$, а при глубоком вакууме – резкое снижение $\overline{Ш}$. Вызвано это тем, что при быстром создании такой большой разности давлений начинается процесс выделения в лаке летучих фракций в газообразном виде. В связи с этим после пропитки в обмотке наблюдается повышенная пористость полимерной изоляции. При использовании вакуумно-нагнетательного метода пропитки разность давлений создается постепенно и в отличие от скоростного электротермовакуумного метода отмечается увеличение значений $\overline{Ш}$.

При исследовании режимов сушки после пропитки использовались ЭД, предварительно пропитанные скоростным электротермовакуумным методом. В результате проведения опытов для конвекционной сушки и сушки по СВМ получены зависимости, изображенные на рисунке 3.26. Графики режимов СВМ построены для четырех циклов изменения давления с атмосферного до вакуума заданной глубины.

На процесс физико-химических превращений при сушке после пропитки, заключающейся не только в удалении растворителя из обмоток, но и в запекании лаковой пленки, значительное влияние оказывает температура. Кроме того, при сушке СВМ влияние на эффективность процесса оказывает также остаточное давление.

Здесь необходимо отметить, что большое значение $\overline{Ш}$ не всегда свидетельствует об эффективном протекании процесса сушки. Речь идет о создании глубокого вакуума за короткое время, при котором наблюдается процесс «шампанизации», описанный выше при рассмотрении аналогичного соотношения параметров при пропитке. Следствием этого, помимо образования газообразных включений в полости обмотки, является вытеснение лака образовавшимися новообразованиями, что приводит к увеличению $\overline{Ш}$. Поэтому необходимо относиться с осторожностью к увеличению значения

$\overline{Ш}$сверх возможного при естественном удалении летучих фракций. В связи с вышесказанным, следует остерегаться резкого создания глубокого вакуума.

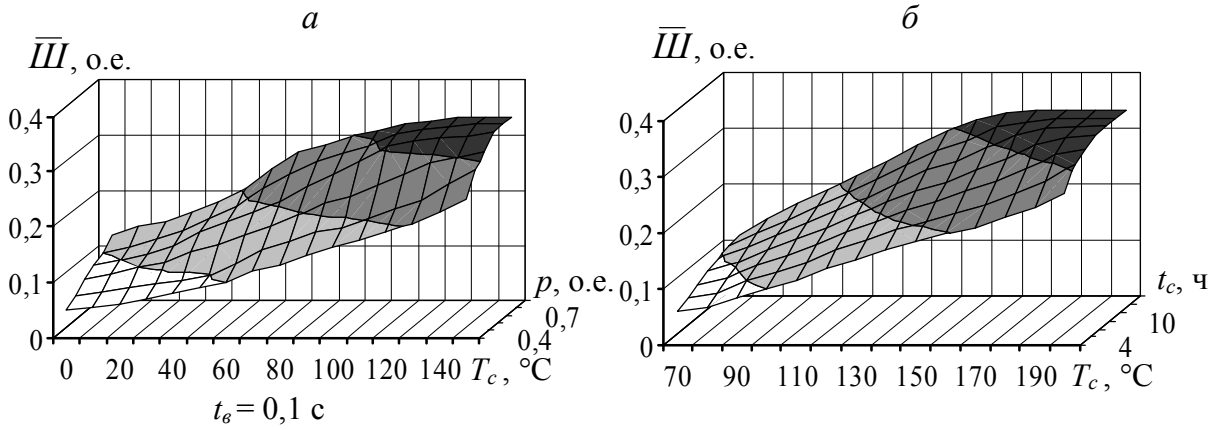


Рисунок 3.26 – Графики зависимости ОДП от параметров процесса сушки после пропитки скоростным электротермовакуумным (*а*) и конвекционным (*б*) методами

Анализируя весь ход технологического процесса пропитки и сушки изоляции, можно заключить, что между значением $\overline{Ш}$и содержанием различных веществ в обмотке существует некоторая закономерность: диэлектрические заполнители обмотки повышают значение $\overline{Ш}$пропорционально их электрическим свойствам [390]. Экспериментальные исследования по увлажнению обмоток перед сушкой позволили прийти к выводу о том, что проводниковые включения и загрязнители снижают значение $\overline{Ш}$.

Таким образом, проведенные многочисленные дополнительные исследования дали возможность получить результаты, достаточные для установления количественных зависимостей между качеством выполнения восстановительных мероприятий и значениями режимных параметров технологической установки.

Применение подробно описанного в первом разделе монографии информационно-логического анализа результатов экспериментальных исследований для получения явного вида целевой функции влияния режимов пропитки и сушки на качество изоляции, позволило выявить нижеследующую зависимость для ОДП [391].

Прежде всего, используя экспериментальные данные, были определены:

- энтропия H(A);
- энтропия H(T);
- количество информации T(A,T);

– коэффициент эффективности передачи информации фактором В к явлению А (К) К(А,В).

Результаты расчета приведены в таблицах В.1 – В.18 и на рисунках В.1 – В.6 приложения В.

Для построения зависимости качества пропитки и сушки обмоток электродвигателей от режимов пропитки и сушки найдены следующие коэффициенты эффективности передачи информации, приведенные в порядке убывания, т. е. по степени влияния факторов на обобщенный диагностический параметр:

1) глубина вакуума – коэффициент эффективности передачи информации К(А,В) = 0,262;

2) время создания вакуума – К(А,В) = 0,218

3) время сушки – К(А,В) = 0,171;

4) время пропитки – К(А,В) = 0,167;

5) температура пропитки – К(А,В) = 0,163;

6) количество циклов вакуумирования с последующим восстановлением атмосферного давления – К(А,В) = 0,103;

7) температура сушки – К(А,В) = 0,033.

Таким образом, в результате применения логического анализа была получена следующая зависимость для ОДП [392]

$$\Psi = p \wedge t_в \vee (t_c \vee t_{пр} \vee T_{пр}) \wedge N_{в.у} \wedge T_c \ , \qquad (3.103)$$

где $t_в$ – время создания вакуума; t_c – время сушки; $t_{пр}$ – время пропитки; $N_{в.у}$ – количество циклов вакуумирования; T_c – температура сушки; $\vee$ – логическая функция дизъюнкции или логическое сложение; $\wedge$ – логическая функция конъюнкции или логическое умножение; () – скобки, обозначающие примерно одинаковое влияние каждого из параметров, находящихся в них, на ОДП.

В итоге, полученная математическая модель пропитки и сушки изоляции электродвигателей позволила дать количественную оценку влияния каждого из факторов на показатель качества ремонта: наибольший положительный эффект качества и интенсификации процессов пропитки и сушки изоляции, согласно результатам данной количественной оценки, достигается от разности потенциалов давления, а наименьший – от температуры сушки. Также ИЛА позволил оценить неучтенные факторы, что сделало логическую зависимость еще более достоверной. Кроме того, были рассчитаны рациональные режимы скоростной вакуумной пропитки и сушки электродвигателей исходя из минимума затрат. Составлены таблицы выбора оптималь-

ных режимов пропитки и сушки обмоток ЭД. Это позволяет говорить об оптимизации ремонта изоляции ЭД методом перебора данных [326, 393]. Предлагаемые режимы сократили температуру сушки на 15 – 20 °С, общую длительность процесса до 1,5 – 2 ч без промежуточных транспортировочных операций по замкнутому циклу.

3.3 Основные результаты и выводы по разделу

1 Полученные в работе зависимости химической реакции между агрессивной средой и химически нестойкими связями полимера позволяют качественно оценить степень воздействия агрессивных сред на изоляцию обмотки двигателя в условиях эксплуатации и определить скорость ее старения, что создало предпосылки к отысканию показателей интенсификации процесса разрушения связующего в ходе ремонта.

2 Для повышения качества и сокращения продолжительности пропитки обмоток электродвигателей, а также удаления из них жидкости и газовых включений необходимо увеличивать градиент давления и критерий Поснова, который характеризует перепад потенциала массопереноса, вызванный разностью температур или разностью давлений. В результате были получены новые закономерности, когда создание градиента давления от 760 до 100 – 150 мм рт. ст. за время 0,1 – 10 с не приводит к постепенной релаксации давления паров и обеспечивает до 95 % переноса вещества в изоляции без фазового перехода.

3 Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса при линейном характере сброса давления, имеющего место при разрушении связующего, пропитке и сушке обмоток, позволило получить результаты, недостаточные для выявления рациональных режимов протекания рассматриваемых процессов и разработки современной технологии ремонта ЭД. В итоге проведен комплекс дополнительных исследований тепло- и массообмена в теле обмотки двигателя с последующим информационно-логическим анализом полученной информации.

4 Разработанный прогрессивный метод электротермовакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции электрических двигателей основан на интенсификации процессов тепломассопереноса, протекающих в обмотках, путем использования перепадов давления между атмосферным и вакуумом за время 0,1 – 10 с, в результате чего удается добиться интенсивного удаления из обмоток влаги и продуктов деструкции, а также

наиболее глубокого проникновения пропитывающего состава в тело обмотки ЭД.

5 Созданная многофункциональная электротермовакуумная установка позволила реализовать в несколько этапов операции по восстановлению электрической изоляции и подтвердить выдвинутую гипотезу о возможности существенного ускорения процессов тепломассопереноса и повышения качества изоляции при разрушении связующего обмоток на начальных стадиях ремонта, ее пропитки и сушки путем создания градиентов давления, температуры и скорости их изменения.

6 Проведенный комплекс дополнительных исследований процессов тепломассопереноса в теле обмотки ЭД позволил выделить наиболее значимые параметры технологического процесса пропитки и сушки изоляции, а также получить логические зависимости изменения значений обобщенного диагностического параметра от различных режимов работы лабораторной установки по пропитке и сушке изоляции электрических двигателей.

7 Решенная задача оценки степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления изоляции обмоток электродвигателей дала возможность выявить и проанализировать все как отрицательно, так и положительно воздействующие на изоляцию ЭД факторы в реальных условиях их эксплуатации и ремонта, осуществив их систематизацию, построить модель жизненного цикла электродвигателя, обоснованно сократив перечень воздействующих факторов, и предложить новые методы обработки информации и количественной оценки степени влияния данных факторов на состояние изоляции двигателя с последующей оптимизацией сроков, объемов, продолжительности и режимных параметров технологических мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту электрических двигателей.

8 Полученная логическая модель пропитки и сушки обмоток электродвигателей позволила дать количественную оценку влияния каждого из факторов на показатель качества изоляции. Наибольший положительный эффект качества и интенсификации процессов пропитки и сушки, согласно результатам данной количественной оценки, достигается от разности потенциалов давления, а наименьший – от температуры сушки. Практическая реализация сделанных теоретических предпосылок дала возможность внести необходимые коррективы в выбор режимов термовакуумной пропитки и сушки обмоток. Предлагаемые режимы сократили температуру сушки на 15

– 20 °С, общую длительность процесса до 1,5 – 2 ч без промежуточных транспортировочных операций по замкнутому циклу.

9 Результаты исследования позволили осуществить постановку задачи оптимизации, где основным критерием эффективности является минимизация затрат на выполнение операций технологического процесса пропитки и сушки изоляции ЭД при обеспечении качества работ не ниже заданного, а также прогнозирование остаточного срока службы электрического двигателя.

4 ЭЛЕКТРОТЕРМОВАКУУМНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОПИТКИ И СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Серьезной проблемой для агропромышленного комплекса страны на протяжении многих лет остается хронический недостаток техники, поставляемой селу. В течение длительного периода потребность сельскохозяйственного производства в основных машинах и оборудовании удовлетворялась лишь на 25 – 50 % [394, 395], а за последние годы этот уровень снизился еще. Фермы многих хозяйств не более чем на 35 – 40 % обеспечены механизированными сооружениями для хранения кормов, переработки и хранения навоза, низка надежность инженерных коммуникаций (энерго-, тепло- и водоснабжения), почти не применяются технологии и технические средства, обеспечивающие охрану окружающей среды [396, 397].

Сегодня в России практически отсутствует производство кормораздатчиков и кормоприготовительной техники, оборудования для свиноводства и овцеводства, полностью осталось вне пределов России производство техники для доения и охлаждения молока на фермах и других важнейших видов машин. Из-за отсутствия современных технологий, снижения трудовой дисциплины со стороны специалистов и работников сохраняются высокая трудоемкость производства, дефицит кадров, тяжелый, непривлекательный труд. При этом, несмотря на возросшие показатели уровня механизации работ, из-за низкого технического уровня, качества изготовления и надежности техники не обеспечивается сокращение численности работающих в отрасли [1]. Кроме того, используемое электрооборудование имеет неудовлетворительный внешний вид из-за некачественной окраски и плохо проработанного дизайна, малые амортизационные сроки.

Отсутствие эквивалентности в ценах на сельскохозяйственную продукцию и поставляемые машины, строительные материалы, комбикорма, добавки, ветеринарные препараты привело к резкому снижению рентабельности отрасли – росту убыточности. Нарушение экономических взаимоотношений затрудняет объективный экономический анализ отрасли и определение путей выхода из кризиса.

На сегодняшний день на сельскохозяйственных предприятиях страны за пределами амортизационных сроков работает около 40 % доильного и 45 % холодильного оборудования, около 50 % кормораздатчиков и т. д. На поддержание их в постоянной технической готовности хозяйства несут большие затраты (70 – 85 % средств от общих расходов на изготовление техники для животноводства и поддержание ее в работоспособном состоянии в течение всего срока службы) [2]. Велики и прямые убытки от потери продукции.

Обеспечение надежной работы электрических машин в течение «второго», а иногда большего срока жизни становится, как и само их производство, весьма проблематичным из-за отсутствия запасных частей и, особенно, из-за дороговизны сервисных услуг. При уменьшении объемов закупаемого элек-

трооборудования необходимо сохранить достигнутый уровень механизации, расширить сервисные услуги, обеспечивающие продление сроков его нормальной эксплуатации [397].

Наряду с основными причинами старения изоляции обмоток электрических машин можно выделить такие причины, как несоответствие использованных электроизоляционных материалов и систем изоляции и их конструкций будущим условиям эксплуатации, нарушения технологии изготовления изоляции, повреждения, возникающие вследствие случайных факторов, например, механические повреждения изоляции ферромагнитными предметами, оказавшимися в обмотке статора.

Ремонт и восстановление работоспособности электрооборудования в АПК осуществляют многочисленные предприятия или ремонтные цеха и участки. Однако на практике восстановление изоляции электродвигателей происходит, как правило, непосредственно на месте их установки – отправка статоров на ремонтные предприятия часто становится нецелесообразной из-за невозможности аккумулирования партии обмоток для загрузки их мощностей, больших транспортных расходов, а также ущерба от недовыпуска продукции [2, 398].

Применяемые методы мелкосрочных ремонтов, как уже отмечалось ранее, не обеспечивают требуемого качества изделий, продолжительны, энергоемки, являются экологически вредными [356]. В этой связи в вопросе создания эффективных технических средств и установок для поддержания и восстановления работоспособности электрических машин в процессе эксплуатации и ремонта, повышения качества ремонта и защиты сельского потребителя от поступления к нему с заводов-изготовителей и ремонтных предприятий некачественных машин и электрооборудования сама жизнь отводит одну из основных ролей разработке и внедрению прогрессивных, экологически чистых технологий диагностики, прогнозирования и ремонта электрических машин [160, 399].

Таким образом, основными требованиями, предъявляемыми к разрабатываемому оборудованию восстановления обмоток двигателей, являются [58, 68, 161, 397]:

– электрофизические свойства изоляции восстановленной обмотки должны соответствовать свойствам современных систем изоляции;
– восстановление обмоток электродвигателей должно основываться на эффективной ресурсосберегающей и экологически чистой технологии;
– следует разрабатывать и использовать технологические процессы или их модификации, отвечающие современным требованиям и гарантирующие заданное качество восстанавливаемой обмотки в процессе эксплуатации и ремонта для различных объектов сельскохозяйственного производства с учетом зональных условий и особенностей, уровня специализации и типоразмеров хозяйств.

4.1 Стационарная и мобильная установки термовакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток ЭД

Положительные результаты представленных в монографии теоретических и экспериментальных исследований процессов переноса теплоты и массы в изоляционных материалах и конструкциях электрических двигателей за счет создания градиента давления определенной величины, стали основанием для разработки и создания экологически чистой безотходной скоростной термовакуумной технологии восстановления изоляции обмоток электродвигателей, обеспечивающей при небольших габаритах технологической установки высокую производительность, качество изделий, сокращение времени протекания данного процесса, экономию трудовых и материальных ресурсов, возможность автоматизации процесса с включением его в единую схему ремонта [371, 380].

Общий вид установки производительностью 20 – 25 тыс. ремонтов в год, внедренной на производственно-ремонтном предприятии Алтайэнерго, выполняющим ремонт электрических машин для сельскохозяйственных предприятий Алтайского края, и реализующей указанную технологию, показан на рисунке 4.1, а функциональная схема данной установки приведена на рисунке 4.2 [400].

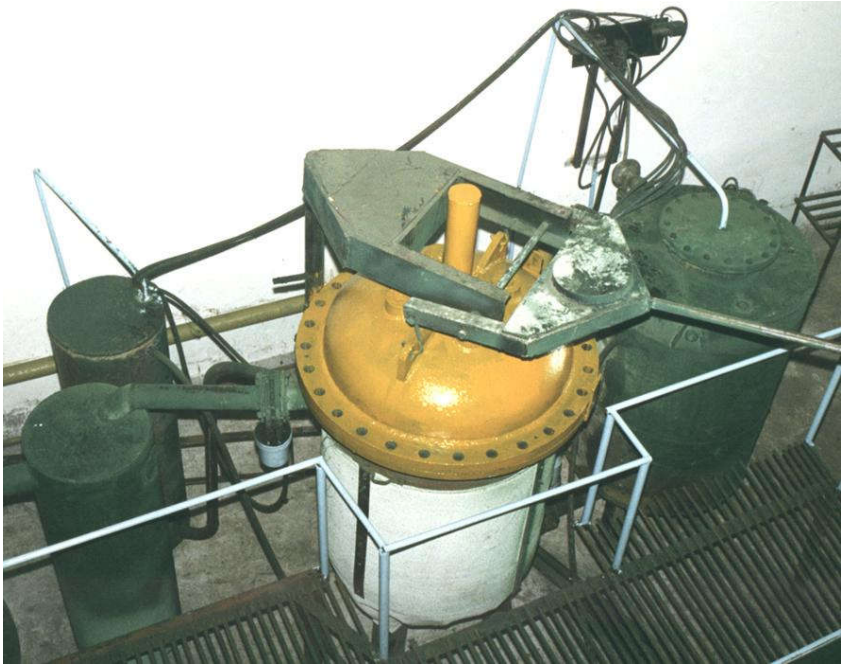


Рисунок 4.1 – Стационарная установка для использования на специализированных предприятиях АПК

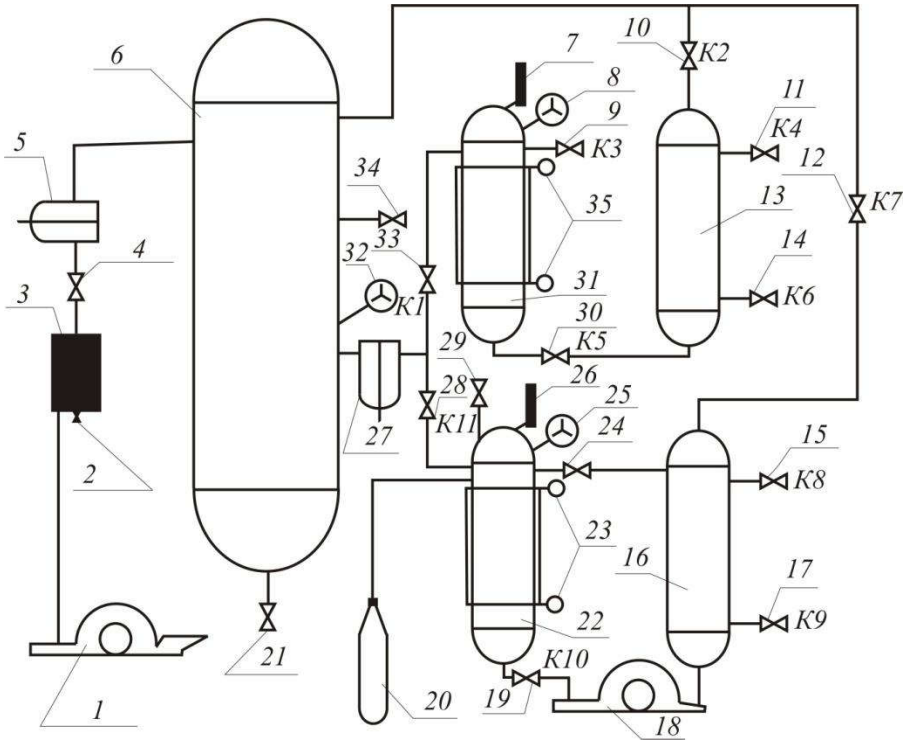


Рисунок 4.2 – Функциональная схема стационарной установки:
1 – вакуумный насос; *2* – кран слива конденсата; *3* – конденсационная колонка; *4*, *9 – 12*, *14*, *15*, *17*, *19*, *24*, *29*, *30*, *34* – вентили; *5*, *27* – влагомассоотделители; *6* – ресивер; *7*, *26* – термометры; *8*, *25*, *32* – манометры; *13* – смесительный котел; *16* – резервуар для водного раствора; *18* – циркуляционный водяной насос; *20* – баллон с углекислотой; *21* – кран слива отстоя ресивера; *22* – автоклав для разрушения связующего обмоток; *23*, *35* – индукционные обогреватели; *28*, *33* – быстродействующие задвижки; *31* – автоклав для пропитки и сушки

Конструктивно стационарная установка выполнена в виде отдельных модулей, соединенных между собой системой трубопроводов с возможностью совместного и раздельного проведения технологических операций. Размеры модулей и их количество в соответствии с типоразмерным рядом определяются габаритами рабочих емкостей [401, 402]. При этом отметим, что для крупных ремонтных предприятий с программой ремонта 100 тыс. ремонтов в год и более рекомендуется увеличивать не объем автоклава, а количество модулей, работающих на один ресивер и насос. Это можно делать и при необходимости в одновременной работе с различными лаками при пропитке изделий широкой номенклатуры или, как в нашем случае, при параллельном выполнении операций по разрушению связующего и восстановлению изоляции обмоток ЭД. Увеличивать объем автоклава более 3 м^3 нецелесообразно, т. к. это усложняет конструкцию установки и не повышает эффективность ее функционирования [156, 403].

Необходимым условием скоростной вакуумной пропитки и сушки на рассматриваемой установке является предварительное создание в ресивере вакуума, глубина которого, как показали результаты экспериментов, зависит от вида

пропитываемого изделия и пропитывающего состава и лежит в пределах 150 – 100 мм рт. ст. [402].

Поскольку автоклав – сложное устройство с большим количеством сварных швов и уплотнений, о степени его герметичности можно судить по величине натекания. Последняя зависит как от конструкции автоклава, так и от качества его изготовления [404]. В верхней части корпуса рабочей емкости предусмотрен патрубок для крепления трубопровода и создания вакуума, в нижней – патрубок для входа и выхода пропиточного состава, а также кран для связи с атмосферой. Кроме того, рассматриваемая пропиточно-сушильная камера снабжена соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой. Загрузка и выгрузка статоров двигателей в автоклав и из него производится в специальные контейнеры с помощью подъемных механизмов.

Пропиточный лак в исходном состоянии находится в накопителе, а для пополнения израсходованного в ходе пропитки лака из указанной емкости служит дополнительный сосуд. Там же вязкость пропиточного состава доводится до расчетной.

Проведенные автором теоретические и экспериментальные исследования процессов переноса вещества в теле обмоток статоров ЭД [181, 346] позволили рекомендовать к использованию на термовакуумной установке разработанный метод скоростной вакуумной пропитки и сушки для гидролитической деструкции связующего, позволяющий техническому раствору проникать на всю глубину обмотки, а также эффективно выносить из последней остатки разрушенного слоя связующего, пропитывающего изоляцию и скрепляющего обмотку с железом статора [405].

Конструкция автоклава для ГДС аналогична конструкции автоклава для пропитки лаком. В свою очередь и емкость для хранения водного деструктирующего раствора мало отличается от рабочей емкости. Исключением является лишь то, что данную емкость можно без необходимости не снабжать устройством для обогрева.

После загрузки оборудования в автоклав в ресивере создается вакуум заданной глубины. Для этой цели существует большое количество вакуумных насосов различного вида и марок – механические, пароструйные, бустерные, а также насосы параллельного и последовательного действия, с водяным, воздушным и масляным охлаждением. На пути от ресивера к вакуумному насосу установлен поверхностный конденсатор для конденсации паров влаги и растворителя при их откачке вакуум-насосом, защищающий последний от попадания в него воды.

Находящиеся в автоклаве статорные обмотки нагреваются и при достижении необходимой температуры нагрева вакуумируются путем соединения автоклава с ресивером через клапан К1. Описанная процедура соответствует предварительной сушке обмоток электродвигателей. Способ обогрева автоклава может быть различным: паровой, воздушный, электрический, индукционный и др. Его выбор обусловлен, как правило, возможностями реального производства, требованием минимального времени нагрева обмоток, ис-

ключающим тепловой удар, а также энергетическими характеристиками нагревателя. В свою очередь, количество циклов вакуумирования, как отмечалось ранее, определяется степенью увлажненности обмоток, а скорость вакуумирования – соотношением длины и диаметра трубопровода между автоклавом и ресивером, а также соотношением их объемов.

По окончании предварительного вакуумирования обмоток пропиточный состав из соответствующей емкости за счет созданного разрежения поступает в автоклав. После заполнения пропитывающей жидкостью автоклава статорные обмотки вновь кратковременно вакуумируются в течение 0,1 – 10 с, подвергаясь объемной глубокой пропитке. Изменяя глубину вакуума и соотношение объемов ресивера и автоклава, можно добиться больших значений показателей качества восстанавливаемой обмотки ЭД. Излишки лака с поверхности статоров и пакетов удаляются вакуумным прососом.

В случае пропитки обмоток лаком или компаундом, после удаления данной пропитывающей жидкости из автоклава, статорные обмотки дополнительно нагреваются и вакуумируются в целях быстрого удаления растворителя из лака. Количество циклов вакуумирования определяется типом лака и пропитываемой обмотки. На заключительном этапе осуществляется полимеризация лаковой пленки посредством дальнейшего повышения температуры в автоклаве с вакуумным прососом через него воздуха. Указанная процедура способствует удалению паров растворителя и лучшему воздухообмену [371].

Таким образом, разрушение связующего, пропитка и сушка обмоток по замкнутому циклу, использованные в рассмотренной электротепловой вакуумной установке, обеспечивают возможность полной автоматизации всего технологического процесса [158, 403]. При этом ее техническими характеристиками являются:

глубина вакуума, создаваемого в ресивере, мм рт. ст.	0,5 – 760
диапазон изменения температуры в автоклаве, °С	20 – 200
время набора заданной температуры (max – min), мин	60 – 10
время набора вакуума в ресивере (max – min), мин	5 – 15
время создания заданной глубины вакуума в автоклаве, с	0,1 – 20
режим управления	ручной, автоматический
габариты	7 × 3 × 5

Выполнение заранее задаваемой программы технологических операций разрушения связующего, пропитки и сушки возможно только при наличии соответствующих контрольно-измерительных приборов (КИП). Применение электрических методов измерения позволяет: передавать показания на большие расстояния; обеспечивать комплексное решение задач автоматического контроля совместно с задачами сигнализации, управления и регулирования; легко произ-

водить графическую запись значений измеряемой величины и контролировать быстропротекающие процессы.

Приборы, применяемые в термовакуумной установке для измерения неэлектрических величин, весьма разнообразны. Так, для измерения технологических параметров в сушильно-пропиточных и деструкционных емкостях использовались манометрические и электроконтактные термометры, термометры сопротивления, самопишущие логометры, уровнемеры, расходометры, вакуумметры, а также регуляторы вакуума, автоматы выдержки времени и переключатели.

В целях широкого внедрения разработанной термовакуумной установки в практику сельскохозяйственных предприятий с годовым объемом ремонтов до 1000 усл. ед. и выполнения сушильно-пропиточных работ в процессе эксплуатации и ремонта предусмотрен мобильный вариант установки. В таблице 4.1 указаны основные геометрические характеристики рабочих сосудов предлагаемых установок [58].

Таблица 4.1 – Основные геометрические характеристики сосудов установок

Тип установки	Годовой объем ремонтов, усл. ед.	Геометрические характеристики сосудов		
		рабочий объем автоклава, $м^3$	внутренний объем ресивера, $м^3$	высота автоклава, м
стационарная	до 1000	0,14	0,9	0,7
	1000 – 5000	0,5	4,8	1,0
	5000 – 10000	0,9	8,0	1,2
	10000 – 25000	1,6	15,8	1,4
мобильная	до 1000	0,14	1,4	0,7

Как уже упоминалось ранее, доставка подлежащих ремонту электродвигателей на ремонтное предприятие часто бывает невозможна в силу, например, отсутствия у сельскохозяйственного производителя обменного фонда ЭД, существующего графика их обслуживания и ремонта, а также дороговизны операций по транспортировке двигателей к месту ремонта и обратно. Разработанная установка скоростной вакуумной пропитки и сушки обмоток, выполненная в мобильном варианте на базе шасси автомобиля ЗИЛ, позволяет решить эту проблему [406]. Данная установка, схематично изображенная на рисунке 4.3, ориентирована на восстановление изоляции обмоток наиболее распространенных типоразмеров электродвигателей мощностью от 2,2 до 7 кВт [15] при сохранении высокого качества изделий на выходе указанного процесса. Функциональная схема и принцип действия мобильной установки скоростной вакуумной пропитки и сушки обмоток электродвигателей аналогичны тому, что представлено на рисунке 4.2.

Данная передвижная установка может быть модифицирована в мобильный комплекс, оснащенный необходимым оборудованием для диагностики и

прогнозирования технического состояния изоляции, мелкого ремонта обмоток, пропитки и сушки электрической изоляции, а также капитального ремонта электродвигателей, включая перемотку статора ЭД, непосредственно на месте установки последнего [397].

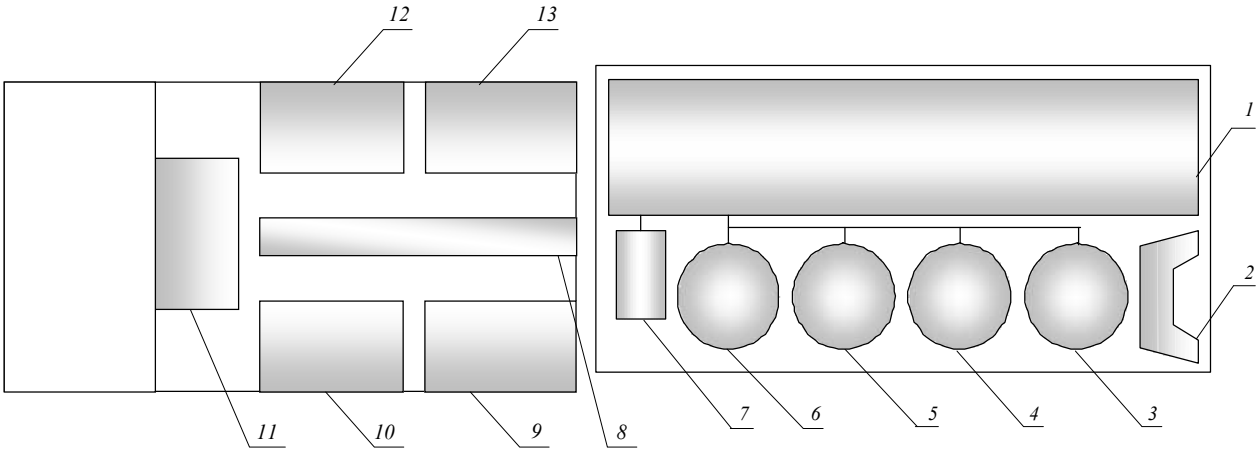


Рисунок 4.3 – Схема размещения модулей передвижного комплекса технических средств восстановления электродвигателей на базе шасси автомобиля с прицепом: *1* – вакуумный ресивер; *2* – пульт управления; *3* – емкость для разрушения связующего; *4* – дополнительная емкость; *5* – рабочая емкость; *6* – емкость с лаком; *7* – вакуумный насос; *8* – тельфер; *9* – запчасти; *10* – рабочий стол; *11* – станок; *12* – стенд; *13* – запас провода

Таким образом, время простоя оборудования из-за неисправности электродвигателя и связанный с этим ущерб могут быть сведены к минимуму путем внедрения передвижного ремонтно-диагностического комплекса, позволяющего решать не только проблему труднодоступности и удаленности сельскохозяйственных районов, но и низкой надежности эксплуатирующихся в сельском хозяйстве ЭД [407]. Разработанный передвижной комплекс может быть использован по мере необходимости при соответствующей востребованности хозяйствами и предприятиями агропромышленного комплекса на основании графиков ТОиР, создаваемых по рекомендациям, приведенным в пятом разделе монографии. Передвижной ремонтно-диагностический комплекс включает в себя установку по разрушению связующего, пропитке и сушке изоляции обмоток, расположенную на прицепе, и лабораторию-мастерскую по диагностике и ремонту ЭД, расположенную в кунге на базе шасси автомобиля ЗИЛ.

Себестоимость ремонта определяется затратами его производителя. Тогда такая составляющая затрат потребителя электроэнергии на ремонт, как доставка вышедшего из строя двигателя на специализированное ремонтное предприятие и обратно, не рассматривается, т. к. экономическое сравнение проводится в рамках ремонтного предприятия. Однако, если рассматриваемый метод восстановления ЭД реализуется с помощью мобильной установки, перемещающейся к вышедшему из строя двигателю, то затраты на транспортировку данной установки войдут в себестоимость ремонта.

В таком случае, используя для расчета себестоимости ремонта совокупность двух составляющих: эксплуатационных затрат и затрат на работу установки, и опуская рассмотрение составляющих затрат для каждого из реализуемых ею этапов, согласно рекомендациям [408 – 410] получим следующую экономическую эффективность внедрения разработанной мобильной установки электротеплового вакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток электродвигателей:

экономический эффект за срок службы $Э_c$ = 1341375,51 руб.;

экономический эффект от внедрения не единицу мощности $\frac{P_1}{P_2} = 2{,}44$ руб./руб.;

годовой экономический эффект от внедрения мобильной установки электротепловой вакуумной пропитки и сушки составил 328637 руб. в ценах 2000 г.

Расчет производился для трех крестьянских хозяйств, равноудаленных от ближайшего специализированного ремонтного предприятия на 50 км и находящихся друг от друга на расстоянии 10 км, в каждом из которых вышло из строя 10 ЭД указанной мощности.

4.2 Система информационно-программного сопровождения электротермовакуумной технологии восстановления изоляции электрических двигателей

Для современного этапа развития электрификации в рамках системы повышения надежности электродвигателей важным является необходимость сбора, хранения и учета большого количества информации о состоянии объектов, которая содержит технические данные, сведения об условиях эксплуатации (параметрах окружающей среды и режимах работы), результаты диагностики двигателей. Выполнение требования математической обработки накопленного объема информации и определения динамики изменения состояния электродвигателей, а также принятия решений о сроках проведения следующей диагностики, технического обслуживания или ремонта, об объеме работ обусловили создание рабочего инструментария, с помощью которого можно проводить контроль и прогнозирование состояния изоляции ЭД [347].

Для успешного решения поставленных в работе задач система информационно-программного сопровождения должна позволять [271]: накапливать информацию у потребителей о техническом состоянии и условиях эксплуатации электродвигателей, сроках и способах устранения дефектов; накапливать информацию у потребителей и в аналитических центрах о совокупной выборке электрооборудования по типам и сравнимым конструкциям; обрабатывать и анализировать накапливаемую информацию на всех уровнях, разрабатывать мероприятия по выявлению дефектов и восстановлению работоспособности электродвигателей; обмениваться оперативной информацией посредством компьютерных сетей о результатах проведенного контроля, его анализа, об

аналогичных дефектах, способах и результатах их устранения; получать из центров все виды документации по эксплуатации и ремонту ЭД; использовать целевые экспертные системы, часть которых обрабатывается потребителями, другая – в аналитических центрах; вести оперативный контроль, диагностирование и прогнозирование технического состояния электродвигателей.

Сбор, хранение и обработка информации строятся на нескольких уровнях: координационный центр (завод-изготовитель, отраслевая организация), региональный центр, потребитель – владелец электродвигателей. При этом несомненными преимуществами системы информационно-программного сопровождения на базе ЭВМ являются: разрешение проблемы проведения сложных вычислений, исключение ошибки в расчетах, простота изменения алгоритма расчета, что может потребоваться при выполнении научных исследований, отсутствие необходимости работать со множеством справочников – данные становятся легкодоступными [411]. Одновременно с этим решается и ряд производственных задач [190, 278].

Разработанная система информационно-программного сопровождения электротермовакуумной технологии предназначена для комплексного решения проблемы математического обеспечения контроля и прогнозирования технического состояния ЭД, а также для автоматизированного управления технологическими процессами разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции обмоток [57, 412, 413]. Данная система состоит из трех подсистем (рисунок 4.4):

а) **АРМ оператора** установки вакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции электрических машин, обеспечивающее управление установкой в трех режимах: автоматическом, полуавтоматическом (управление отдельными циклами технологического процесса) и ручном (например, для настройки системы);

б) **АРМ технолога**, включающее следующее программное обеспечение для персонального компьютера:

– информационно-справочный программный комплекс, в состав которого входят базы данных по двигателям и условиям их эксплуатации, а также база данных для ведения контроля технического состояния ЭД;

– научно-исследовательский программный комплекс, предназначенный для математического обеспечения научно-исследовательских работ: имитационного моделирования состояния изоляции электродвигателей и оценки коэффициентов уравнений моделей старения их изоляции [382, 414];

в) **сервис**, обеспечивающий связь посредством компьютерных сетей с другими ЭВМ, а также включающий в себя текстовый редактор.

Рисунок 4.4 – Структурная схема разработанной системы информационно-программного сопровождения электротермовакуумной технологии

Функционирование рассматриваемой автоматизированной системы управления оборудованием диагностики, поддержания и восстановления работоспособности электрических машин осуществляется следующим образом [415].

С помощью переносного прибора с автономным питанием (например, прибора серии ИЗК) проводится замер параметров изоляции электродвигателя [58, 270]. Затем полученные данные с диагностического прибора поступают в ЭВМ, где они математически обрабатываются и заносятся в журнал для соответствующего двигателя. Необходимые параметры диагностики изоляции, а также динамика их изменения выводятся в удобном для визуального контроля виде. Задачей оператора электрооборудования является принятие решения о целесообразности дальнейшей эксплуатации двигателя либо о не-

обходимости проведения его технического обслуживания и ремонта, например сушки, пропитки или разрушения связующего.

У поступающих для капитального ремонта двигателей с вышедшей из строя обмоткой производится ее перемотка на соответствующем оборудовании [348, 349].

В связи с тем, что в настоящее время существует большое количество литературы, работа с которой в некоторых случаях вызывает сложности, при непосредственном участии автора создана база данных обмоточных характеристик электрических двигателей различных серий. Эта база данных содержит различные параметры, необходимые для перемотки двигателей. При этом по номинальным данным ЭД можно легко найти эталонные значения обобщенного диагностического параметра.

Управление установкой термовакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции ЭД осуществляется с помощью персонального компьютера. В автоматическом режиме работы оператор контролирует протекание технологического процесса, и участие человека требуется лишь при внештатных ситуациях. При работе же в полуавтоматическом режиме система не должна допускать выполнения неверных операций, которые могут привести к аварийному режиму.

На заключительной стадии процесса проверяется качество отремонтированного электродвигателя с помощью соответствующих диагностических приборов. Полученные результаты замеров через устройство ввода-вывода заносятся в журнал технического состояния двигателя. После соответствующей математической обработки на экран дисплея выводится информация, по которой можно судить о дальнейших мероприятиях по повышению эксплуатационной надежности электрического двигателя.

Таким образом, разработанная система информационно-программного обеспечения комплекса мероприятий по восстановлению работоспособности электродвигателей на стадии технического обслуживания и ремонта повышает эффективность его функционирования и обеспечивает решение проблемы повышения надежности электродвигателей посредством качественного, с наименьшими затратами времени и материальных средств их обслуживания и ремонта.

4.2.1 Схема автоматизации работы технологической установки разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции двигателей

В настоящем пункте рассмотрена схема автоматизации работы технологической установки разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции двигателей. К системе управления работой установки и связанному с ней производственному оборудованию можно применить различные системы регулирования. Для того, чтобы выбрать наилучшие технологическую схему, комбинацию производственного технологического оборудования, а также систему регулирования необходимо эти факторы рассматривать в совокупно-

сти с учетом экономичности, надежности и качества получаемых изделий [416].

Система автоматического регулирования призвана контролировать переменные величины, характерные для рассматриваемого процесса, сравнивать с заданными значениями, принудительно изменяя их, максимально приближать к оптимальным. Автоматическое устройство должно иметь первичный преобразователь, измеряющий определенную величину, подлежащую регулированию в данном процессе, и преобразующий ее в другую величину, удобную для воздействия на управляющий орган; управляющий орган, который воспринимает это воздействие, сравнивает его с заданным и при отклонении передает соответствующий сигнал на исполнительный орган, восстанавливающий первоначально заданное значение регулируемой величины.

Системы автоматического регулирования (рисунок 4.5) могут быть замкнутые и разомкнутые. Замкнутые системы управляют процессом, используя замкнутую цепь воздействия, состоящую из цепи автоматического контроля (объект регулирования, первичный преобразователь, управляющий орган, воспроизводящий орган) и цепи автоматического управления (задающий орган, управляющий орган, исполнительный орган, объект регулирования) [417].

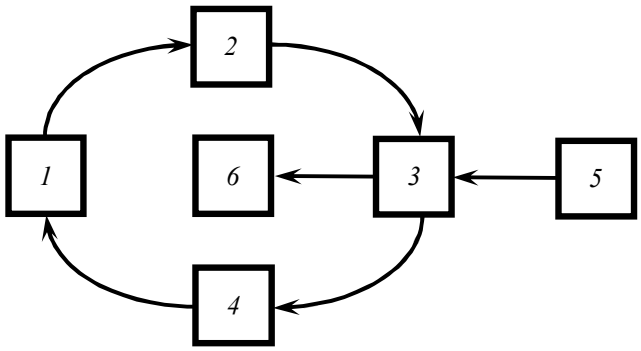


Рисунок 4.5 – Структурная схема системы автоматического регулирования: *1* – объект регулирования; *2* – первичные преобразователи; *3* – управляющие органы; *4* – исполнительные органы; *5* – задающие органы; *6* – воспроизводящий орган

Как уже указывалось, разработанный новый универсальный метод пропитки и сушки изоляции электрических машин использует идею скоростного (импульсного) создания градиента давления между двумя сообщающимися сосудами [402, 418]. В результате происходит повышение производительности и экономичности работы технологического оборудования за счет сокращения длительности процесса пропитки и сушки электротехнических изделий, расширения функций установки и повышения качества рассматриваемого процесса [419, 420]. При этом технологическая установка позволяет в широком диапазо-

не изменять такие параметры, как время и температуру нагрева, градиент давления, скорость его изменения, глубину вакуума [399, 421].

Для контроля параметров температуры в автоклаве и баке для лака врезаны карманы с установленными в них термометрами сопротивления (ТСМ). Контроль параметров давления во всех емкостях осуществляется за счет вмонтированных отборов для установки вакуумметров – регулирующих (М-16СгВУ-1Ех) для автоклава и бака и регулирующего с блокирующим (ЭКМВ-1У) – для ресивера. Для контроля уровня лака в сушильно-пропиточном автоклаве установлены акустические сигнализаторы уровня (АСУ-4) для верхнего и нижнего значений, для контроля уровня в баке для лака – акустический сигнализатор уровня АСУ-4.

На рисунке 4.6 приведена схема расстановки элементов автоматики для установки скоростной вакуумной пропитки и сушки [1]. Электротехнические изделия, например, статоры электродвигателей, размещают в автоклаве (*4*). Запорные устройства (К1 – К5) закрывают. Питание подается на схему автоматики поворотом ключа в положение «Авт». Вакуумный насос (*1*) запускается и создает вакуум в ресивере (*3*). Одновременно подается напряжение в схему питания ТЭНов и производится нагрев полости автоклава и бака с лаком до температуры, которая поддерживается автоматически регулятором температуры. По достижении в ресивере (*3*) остаточного давления, определяемого по вакуумметру, дается команда на открытие запорного устройства К1, соединяющего его с автоклавом. Происходит вакуумирование паров влаги, испарившейся из изоляционного материала обмоток.

Вакуумметр контролирует остаточное давление в автоклаве (*4*) и выдает команду на закрытие запорного устройства К1 при установленных показаниях. Открывается запорное устройство К3 и давление в автоклаве (*4*) повышается до атмосферного. Далее блок автоматически запускает режим пропитки обмоток. Согласно временной диаграмме, одновременно открывают запорные устройства К1, К4, К5, с помощью которых производится вакуумирование лака. При достижении нижнего уровня лака в баке (*5*) сигнализатор уровня дает команду на отключение ТЭНов бака во избежание его перегрева. Закрытие запорных устройств К4 и К5 происходит по команде от акустического сигнализатора уровня при достижении верхнего уровня в автоклаве (*4*). Запорное устройство К1 закроется в момент создания остаточного давления. Закрывающееся запорное устройство К1 дает команду на открытие К3, и в автоклаве создается атмосферное давление. Затем происходит импульсное вакуумирование пропиточного состава путем обратного открытия запорного устройства К1. Далее для перекачки пропиточного состава обратно в бак открываются запорные устройства К3, К2, К5 и под действием вакуума пропиточный состав перекачивается в бак. Остаточный вакуум удаляется открытием К4.

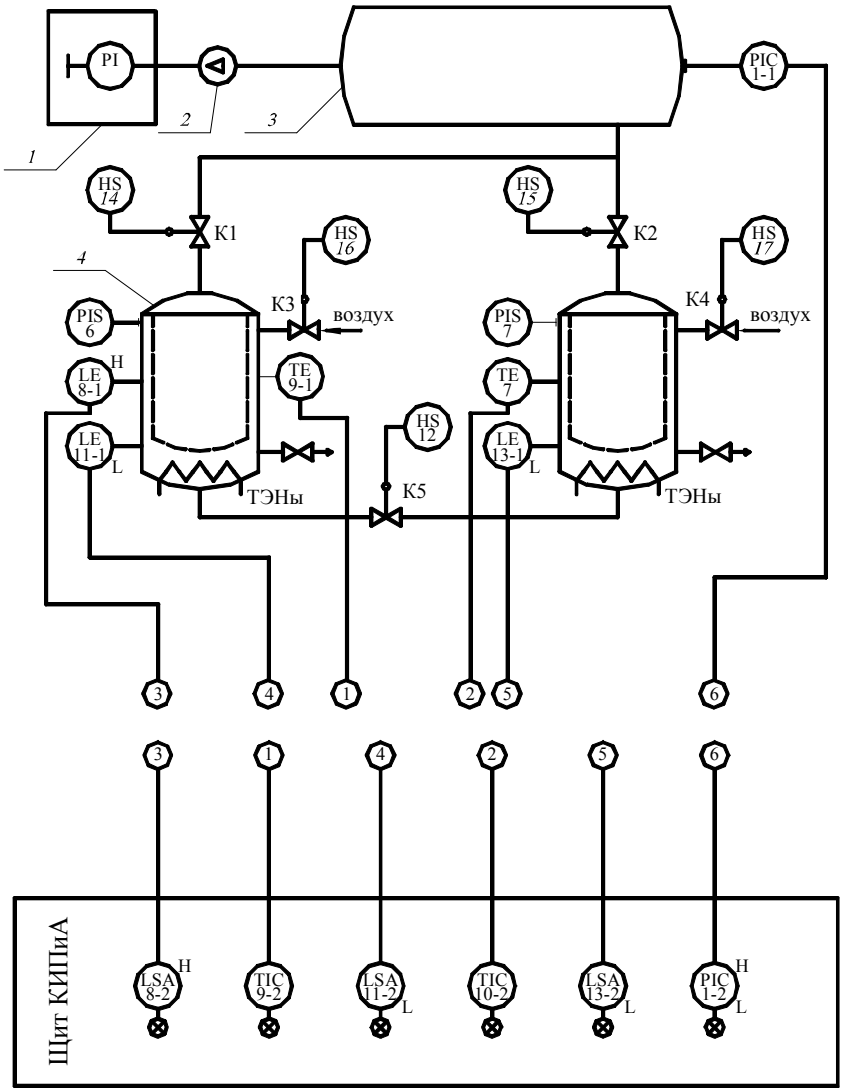


Рисунок 4.6 – Схема расстановки приборов автоматики:
(PIS) – вакуумметр показывающий с контактным устройством; (HS) – вакуумный клапан с электромагнитным приводом; (LE) – первичный преобразователь измерения уровня; (TE) – первичный измерительный преобразователь для измерения температуры; (TIC) – регулятор температуры автоматический; (LSA)$^{H}_{L}$ – устройство сигнализации уровня верхнего и нижнего значений; (PIC)$^{H}_{L}$ – прибор для измерения, сигнализации и позиционного регулирования вакуума; H, L – индексы верхнего и нижнего предела измеряемой величины

Автоматика подготавливает органы управления к выполнению следующего цикла (сушка после пропитки). При наличии в ресивере (*3*) остаточного давления открывается запорное устройство и происходит вакуумирование автоклава. Закрывается К1 командой от вакуумметра, установленного на автоклаве. Открывается запорное устройство К3, давление в автоклаве (*4*) поднимается до атмосферного.

Данный процесс продолжается циклически 4-5 раз до завершения процесса полимеризации пропиточного состава. Затем изделия извлекают из автоклава.

4.2.2 Выбор управляющих воздействий на процессы разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции

На сегодняшний день существует целый спектр схожих характеристик и технических устройств для регистрации управляющих воздействий на процессы разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции электрических двигателей. Осуществив анализ их особенностей, произведем выбор наиболее приемлемых с технической точки зрения решений для рассматриваемых задач.

Измерение температуры. Для измерения температур применяются контактные и бесконтактные методы [422]. Для реализации контактных методов измерения используются термометры расширения (стеклянные жидкостные, манометрические, биметаллические и дилатометрические), термопреобразователи сопротивления (проводниковые и полупроводниковые) и термоэлектрические преобразователи. Бесконтактные измерения температуры осуществляются пирометрами (квазимонохроматическими, спектрального отношения и полного излучения).

Контактные методы измерения более просты и точны, чем бесконтактные. Но для измерения температуры необходим непосредственный контакт с измеряемой средой и телом. В результате этого может возникать: с одной стороны, искажение температуры среды в месте измерения, с другой – несоответствие температуры чувствительного элемента и измеряемой среды. Это несоответствие температур, или погрешность восприятия чувствительным элементом термометра измеряемого параметра в стационарном режиме, имеет место, если происходит теплообмен между термоприемником и измеряемой средой или частями технологического оборудования. Бесконтактные методы измерения не оказывают никакого влияния на температуру среды или тело. Но они сложнее и их методические погрешности существенно больше, чем у контактных методов.

Серийно выпускаемые термометры и термопреобразователи охватывают диапазон температур от –260 до 2200 °С и кратковременно даже до 2500 °С. Бесконтактные средства измерения температуры серийно выпускаются на диапазон температур от 20 до 4000 °С [116, 423].

Во всех измерительных цепях и практически во всех информационно-измерительных системах сигналы от первичных измерительных преобразователей поступают на вторичные измерительные приборы и преобразователи, которые, как правило, располагаются на различных щитах управления. Вторичные электрические измерительные приборы бывают аналоговые и цифровые, показывающие и регистрирующие, одно- и многоканальные, миниатюрные, мало- и полногабаритные и т. д. Для удобства контроля и управления технологически-

ми процессами получили широкое распространение малогабаритные, многошкальные, цифровые и другие виды показывающих и регистрирующих вторичных приборов типа А-500, А-600 и БА [424, 425].

Измерение давления. Широкое использование давления в научных исследованиях и в различных отраслях народного хозяйства вызывает необходимость применения большого числа средств измерения давления и разности давлений, различных по принципу их действия, устройству, назначению и точности. При измерении давления нас могут интересовать абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления.

При контроле технологических процессов и при проведении научных исследований в большинстве случаев приходится иметь дело с измерением избыточного и вакуумметрического давлений, а также с измерением разности давлений. Прибор, измеряющий избыточное или вакуумметрическое давление в широком диапазоне – от 5 кгс/м^2 (50 Па) до 10 000 кгс/см^2 (1000 МПа), называют манометром избыточного давления и вакуумметром [426]. Если по условиям организации централизованного технологического контроля и управления аппаратами или теплоэнергетическими установками не могут быть использованы приборы давления прямого действия, то применяют приборы электроконтактные и с дистанционной передачей показаний.

Измерение уровня жидкостей. Измерение уровня жидкостей играет важную роль при автоматизации технологических процессов во многих отраслях народного хозяйства. Эти измерения особенно важны в тех случаях, когда поддержание некоторого постоянного уровня, например, уровня воды в барабане парогенератора, уровня жидкости в резервуарах, аппаратах и других устройствах, связано с условиями безопасной работы оборудования. Технические средства, используемые для измерения уровня жидкости, называются уровнемерами, а приборы, предназначенные для сигнализации предельных уровней жидкости, – сигнализаторами уровня.

Уровнемеры, предназначенные для измерения уровня жидкости для поддержания его постоянным, имеют двустороннюю шкалу, а служащие для измерения количества жидкости в резервуарах и других устройствах, имеют одностороннюю шкалу.

У сигнализаторов уровня жидкости контактное устройство срабатывает при некотором заданном значении уровня для данного объекта.

В зависимости от требований, предъявляемых к автоматизации технологических процессов, применяют различные методы измерения уровня жидкости. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, уровень жидкости с достаточной точностью и надежностью можно измерять с помощью указательных стекол или показывающими дифманометрами уровнемерами. Для дистанционного измерения уровня жидкостей, находящихся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, применяют метод измерения по разности давлений с помощью дифманометров. Во многих отраслях используют также метод контроля уровня жидкостей с помощью поплавка (или буйка) [427, 428].

4.3 Оптимизация параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей

Для решения проблемы повышения качества ремонта электрических двигателей, обусловленной желанием продлить срок их службы, а также снизить возможный ущерб при выходе двигателя из строя, как было указано в первом разделе монографии, в настоящее время получил распространение ряд технологий восстановления изоляции обмоток, обеспечивающих определенное качество выполняемых операций.

Внедрение на ремонтных предприятиях агропромышленного комплекса технологии, обеспечивающей максимально возможное качество восстановления изоляции ЭД в короткие сроки при небольших эксплуатационных затратах, является одним из эффективных путей достижения цели исследования. Однако этого не происходит. Причиной данной ситуации, сложившейся во многих регионах России и странах ближнего зарубежья, служит незавидное финансовое положение ремонтных предприятий АПК, вызванное снижением спроса на услуги, но не потребности в ней. Снижение спроса у основных потребителей ремонтной услуги – крестьянских хозяйств, обусловлено отсутствием средств на восстановление работоспособности электродвигателей. Кроме того, необходимо отметить, что разные сельскохозяйственные предприятия предъявляют различные требования к качеству ремонта ЭД и срокам его выполнения, что связано с условиями эксплуатации данного электрооборудования и режимами его работы.

Ремонтное предприятие по отношению к сельскохозяйственным потребителям электрической энергии является практически единственным местом, где они могут реализовать свою потребность в ремонте двигателей. Однако его удаленность от сельхозпроизводителя существенно влияет на составляющую ремонтных затрат, которые с учетом транспортных расходов могут превышать стоимость нового электродвигателя. Альтернативой такому положению дел, как было показано выше, может служить создание и внедрение мобильной установки по восстановлению работоспособности ЭД непосредственно на месте их эксплуатации. При этом значительно сократятся транспортные расходы, поскольку поставщик ремонтной услуги, перемещаясь от хозяйства к хозяйству, преодолевает меньшее расстояние, чем путь до ремонтного предприятия и обратно.

Таким образом видно, что внедрение новых технологий восстановления изоляции электрических двигателей в настоящее время сильно тормозится отсутствием финансовых средств и заинтересованности со стороны ремонтных предприятий. Указанную проблему необходимо решать с помощью оптимизации методов ремонта, которая в будущем могла бы привести к повсеместному распространению прогрессивных технологий восстановления изоляции обмоток [429].

4.3.1 Общий подход к оптимизации параметров процесса восстановления изоляции электродвигателей

Важнейшей целью исследования технологических процессов, анализа существующих и синтеза новых технологий является решение задач оптимального управления технологическими процессами. Задачи исследования операций делятся на две категории: прямые и обратные. Прямые задачи отвечают на вопрос: что произойдет, если в заданных условиях будет принято какое-то решение $x \in X$? Для решения такой задачи строится математическая модель, позволяющая выразить один или несколько показателей эффективности через заданные условия и элементы решения [430].

В свою очередь, обратные задачи отвечают на вопрос: как выбрать решение x для того, чтобы показатель эффективности W обратился в максимум?

Далее более подробно рассмотрены обратные задачи исследования операций. При этом постановкой задачи оптимизации решения ограничимся в общей форме.

Пусть имеется некоторая операция A, на успех которой мы можем в какой-то мере влиять, выбирая тем или иным способом решение x, а эффективность операции пусть характеризуется показателем $W \to \max$. Для удобства рассмотрения возьмем детерминированный случай, когда все условия операции полностью известны заранее, т. е. не содержат неопределенности. Тогда все факторы, от которых зависит успех операции, делятся на две группы:

- заданные, заранее известные факторы (условия выполнения операции) α;
- зависящие от нас элементы решения, образующие в совокупности решение x.

При этом заметим, что первая группа факторов содержит, в частности, ограничения, налагаемые на решение, т. е. определяет область возможных значений X.

Тогда показатель эффективности W, который зависит от обеих групп факторов, может быть представлен в виде

$$W = W(\alpha, x). \tag{4.1}$$

Считая, что вид зависимости (4.1) известен, сформулируем обратную задачу следующим образом: при заданном комплексе условий α необходимо найти такое решение $x = x^*$, которое обращает показатель эффективности W в максимум

$$W^* = \max_{x \in X}\{W(\alpha, x)\}. \tag{4.2}$$

Таким образом, выражение (4.2) – типичная математическая задача нахождения максимума функции или функционала, принадлежащая к классу «вариационных задач», хорошо разработанных в математике.

Метод поиска экстремума и связанного с ним оптимального решения x^*

должен всегда выбираться исходя из особенностей функции W и вида ограничений, накладываемых на решение. Например, если функция W линейно зависит от элементов решения $x_1, x_2, ..., x_n$, а ограничения, налагаемые на $x_1, x_2, ..., x_n$ имеют вид линейных равенств или неравенств, возникает ставшая классической задача линейного программирования, которая решается сравнительно простыми, а, главное, стандартными методами [431]. Если функция W выпукла, применяются специальные методы выпуклого программирования с их разновидностью: квадратичным программированием [432]. Для оптимизации управления многоэтапными операциями применяется метод динамического программирования. Наконец, существует целый набор численных методов отыскания экстремумов, специально приспособленных для реализации на ЭВМ.

Все величины в рассматриваемом случае переведены из непрерывных в дискретные, что дает возможность применять методы дискретного программирования [433]. В то же время получаемый результат зависит от результата предыдущего этапа, т. е. возникает необходимость использования методов динамического программирования. Можно сказать, что решение задачи усложняется вследствие необходимости стыковки различных методов ее решения. Это вызывает необходимость поиска более простых методов решения задачи оптимизации.

В случае, если число возможных вариантов решения, образующих множество X, невелико, величина W^* определяется путем сравнения между собой полученных значений для каждого из вариантов. Такой способ нахождения оптимального решения называется «простым перебором». Однако, когда число возможных вариантов решения, образующих множество X, велико, поиск оптимального простым перебором затруднителен, а, зачастую, практически невозможен. В данных случаях применяются методы «направленного перебора», обладающие той общей особенностью, что оптимальное решение находится рядом последовательных «попыток» или «приближений», из которых каждое последующее приближает нас к искомому оптимальному [430].

4.3.2 Постановка и алгоритм решения задачи оптимизации параметров процесса пропитки и сушки изоляции двигателей

Рассматривая задачу оптимизации параметров технологического процесса ремонта изоляции ЭД в целом, целесообразно говорить о трех группах задач. Решение задач первой группы позволяет установить оптимальные режимы работы технологических установок на различных этапах процесса восстановления изоляции. Результатом решения задач второй группы является оптимальное сочетание методов, используемых на различных этапах технологического процесса. При решении задач третьей группы могут быть получены оптимальные сочетания условий эксплуатации электродвигателей и технологий пропитки и сушки их изоляции в зависимости от дополнительных условий задачи.

Постановки задачи оптимизации параметров технологий пропитки и

сушки изоляции двигателей в общем виде выражают интересы сторон, участвующих в данном процессе. Рассмотрим более подробно выбор стратегии оптимизации параметров процесса пропитки и сушки изоляции с учетом связи интересов сторон, принимающих участие в восстановительных мероприятиях, с постановками задач оптимизации.

Заинтересованность эксплуатирующей электродвигатели организации в максимизации срока безотказной работы двигателя $t_{сл}$, в минимизации суммарных затрат на эксплуатацию и ремонт ЭД $З_{\Sigma}$, а также в минимизации срока ремонта $t_{рем}$ очевидна. Формально эти интересы могут быть записаны следующим образом

$$t_{сл} \to \max;\ З_{\Sigma} \to \min;\ t_{рем} \to \min. \qquad (4.3)$$

Во многих случаях для упрощения решения многокритериальных задач оптимизации применяются постановки, в которых доминирующим остается только один критерий оптимизации, а на значения всех остальных критериев налагаются ограничения [434 – 437]. При этом многокритериальные задачи сводятся к однокритериальным задачам с ограничениями. В нашем случае наиболее возможными представляются следующие постановки задач оптимизации:

$$\max\{t_{сл}\ \ \forall u \in U\}\ \text{ при }\ З_{\Sigma} \le З_{У\,зад}\ \text{ и }\ t_{рем} \le t_{рем.зад}; \qquad (4.4)$$

$$\min\{З_{\Sigma}\ \forall u \in U\}\ \text{ при }\ t_{сл} \ge t_{сл.зад}\ \text{ и }\ t_{рем} \le t_{рем.зад}; \qquad (4.5)$$

$$\min\{t_{рем}\ \forall u \in U\}\ \text{ при }\ З_{\Sigma} \le З_{\Sigma\,зад}\ \text{ и }\ t_{сл} \ge t_{сл.зад}, \qquad (4.6)$$

где U – множество технологий восстановления изоляции ЭД; u – один из вариантов технологий ремонта; $З_{\Sigma\ зад}$ – заданный уровень затрат (объем средств на ремонт); $t_{рем.зад}$ – заданная продолжительность ремонта при условии выполнения требуемого объема работ.

Постановки задач оптимизации, выражаемые соотношениями (4.4) – (4.6), при отсутствии необходимости учета одного из интересов видоизменяются. При этом задача, которая выражала такой интерес, теряет свою актуальность и не рассматривается, а при доминировании других интересов оставшиеся две постановки задачи принимают вид однокритериальных задач с одним ограничением.

Любая ремонтная организация имеет собственные экономические интересы, выражающиеся в стремлении получения максимальной прибыли, что может быть достигнуто посредством, во-первых, минимизации времени ремонта с целью повышения производительности и, во-вторых, сокращения себестоимости ремонта [419]. Формально это может быть записано в форме

$$t_{рем} \to \min;\ З_{р\Sigma} \to \min. \qquad (4.7)$$

При сочетании интересов вероятны следующие постановки задач оптимизации:

$$\min\{З_{p\Sigma}\ \forall u \in U_1\} \quad \text{при} \quad t_{рем} \le t_{рем.зад}\ ; \tag{4.8}$$

$$\min\{t_{рем}\ \forall u \in U_1\} \quad \text{при} \quad З_{p\Sigma} \le З_{p\Sigma\ зад}\ , \tag{4.9}$$

где U_1 – множество реализуемых технологий ремонта.

Для учета интересов обеих организаций необходимо осуществить постановку задач оптимизации параметров технологического процесса восстановления изоляции ЭД с использованием критериев, которые позволили бы отразить стремления как ремонтника, так и заказчика. Помимо $t_{сл}$ и $t_{рем}$ в роли таких характеристик могут выступить качество выполнения работ и единый экономический критерий [438].

В соответствии со структурой пространства состояния (качества) изоляции ЭД приведенной ниже пространственной модели оптимизации параметров процесса пропитки и сушки, все постановки задач оптимизации необходимо разделить на две группы: задачи, использующие фактические данные о надежности изоляции (например, срок службы $t_{сл}$) и задачи, основывающиеся на использовании измеряемых диагностических параметров. Последние, в свою очередь, можно разделить на задачи, использующие традиционные критерии качества, и задачи, использующие ОДП [247, 439].

При разработке единого экономического критерия оптимизации воспользуемся допущением, что себестоимость ремонта и отпускная цена за ремонт равны. Отсюда за данный критерий примем суммарные затраты на обслуживание и ремонт ЭД

$$З_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{k} S_{м,i} + A + З_{раб} + \sum_{i=1}^{k} У_{пр.i} \cdot t_{пр.i} + З_{тр} + З_{обсл}\ , \tag{4.10}$$

где k – количество вышедших из строя двигателей за период времени t; $S_м$ – стоимость материалов, расходуемых на ремонт одного электродвигателя; A – постоянные затраты на текущее содержание мастерской и амортизационные отчисления; $З_{раб}$ – заработная плата рабочих; $У_{пр.i}$ – убытки от простоя i-го ЭД в единицу времени; $t_{пр}$ – длительность простоя электродвигателей, состоящая из времени ожидания ремонта $t_{ож}$ и времени самого ремонта $t_{рем}$; $З_{тр}$ – транспортные расходы; $З_{обсл}$ – затраты на ежегодное техническое обслуживание.

Методика расчета данных затрат приведена ниже.

Для задач оптимизации третьей группы в общем случае будут иметь место следующие постановки:

$$\max\{t_{сл}(U,X)\ \forall U \in \overline{U}, X \in \overline{X}\} \quad \text{при} \quad З_{\Sigma} \le З_{У\ зад} \ \text{и}\ t_{рем} \le t_{рем.зад}\ ; \tag{4.11}$$

$$\min\{З_{\Sigma}(U,X)\ \forall U \in \overline{U}, X \in \overline{X}\} \text{ при } t_{сл} \geq t_{сл.зад} \text{ и } t_{рем} \leq t_{рем.зад}; \quad (4.12)$$

$$\min\{t_{рем}(U,X)\ \forall U \in \overline{U}, X \in \overline{X}\} \text{ при } З_{\Sigma} \leq З_{\Sigma\,зад} \text{ и } t_{сл} \geq t_{сл.зад}, \quad (4.13)$$

где $\overline{U}$ – множество всех возможных технологий восстановления изоляции.

При использовании для диагностики изоляции метода ВЗК постановки задач оптимизации можно записать с помощью выражений:

$$\min\{З_{\Sigma}(U,X)\ \forall U \in \overline{U}, X \in \overline{X}\} \text{ при } \widetilde{\Psi}_{зад} \leq \widetilde{\Psi} \text{ и } t_{рем} \leq t_{рем.зад}; \quad (4.14)$$

$$\max\{\widetilde{\Psi}(U,X)\ \forall U \in \overline{U}, X \in \overline{X}\} \text{ при } З_{\Sigma\,зад} \geq З_{\Sigma} \text{ и } t_{рем} \leq t_{рем.зад}; \quad (4.15)$$

$$\min\{t_{рем}(U,X)\ \forall U \in \overline{U}, X \in \overline{X}\} \text{ при } \widetilde{\Psi}_{зад} \leq \widetilde{\Psi} \text{ и } З_{\Sigma\,зад} \geq З_{\Sigma}, \quad (4.16)$$

где $\widetilde{\Psi}_{зад}$ – заданное значение нормированного диагностического параметра (требуемое качество ремонта).

Так как задачи второй группы представляют собой самостоятельное образование, их постановки имеют вид, отличный от постановок задач оптимизации параметров технологий пропитки и сушки изоляции ЭД первого уровня. При решении задач этой группы из интересов заказчика учитывается только требование, определяемое формулой (4.15), а все остальные из рассмотрения исключаются. Интересы ремонтника учитываются полностью. При этом в качестве экономического критерия оптимизации целесообразно использовать себестоимость ремонта, которая равна сумме себестоимостей всех технологических операций [438]. Качество процесса восстановления изоляции целесообразно в задачах оптимизации второго уровня оценивать с помощью обобщенного диагностического параметра [177].

Постановки задач оптимизации рассмотренных в первом разделе методов на различных этапах технологического процесса при использовании для диагностики изоляции ОДП формально записываются так:

$$\min\{t_{рем}(u)\forall u \in \overline{U}\} \text{ при } \widetilde{\Psi}_{зад} \leq \widetilde{\Psi} \text{ и } З_{p\Sigma\,зад} \geq З_{p\Sigma}; \quad (4.17)$$

$$\min\{З_{p\Sigma}(u)\forall u \in \overline{U}\} \text{ при } \widetilde{\Psi}_{зад} \leq \widetilde{\Psi} \text{ и } t_{рем} \leq t_{рем.зад}; \quad (4.18)$$

$$\max\{\widetilde{\Psi}(u)\forall u \in \overline{U}\} \text{ при } З_{p\Sigma\,зад} \geq З_{p\Sigma} \text{ и } t_{рем} \leq t_{рем.зад}. \quad (4.19)$$

В то же время, при решении задач первой группы сохраняется необходимость сопоставления интересов ремонтника и заказчика. В этих задачах интересы заказчика учитываются в виде нормируемых значений показателей качества. Следовательно, решение задач оптимизации первой группы преследует своей целью, с одной стороны, снизить затраты производителя ремонта на работу установки, с другой – обеспечить качество ремонта электрической машины не ниже заданного, с третьей – по возможности сократить время протекания процесса. В качестве экономического критерия эффективности

процесса будем использовать затраты на работу установки в исследуемом режиме, а техническими критериями будут служить нормированные разностные показатели качества.

Многообразие методов восстановления изоляции на различных этапах технологического процесса вызывает определенные сложности формирования постановок задач первой группы. Это обусловлено наличием большого количества параметров, значения которых требуется оптимизировать. Следует также учитывать, что для каждого метода, применяемого на определенном этапе технологического процесса, набор параметров индивидуален. Поэтому подробная математическая запись постановки задачи оптимизации параметров рассматриваемых технологий будет соответствовать конкретному методу восстановления изоляции для данного этапа процесса [315, 439, 440].

Под режимом работы будем понимать строго определенное сочетание количественных значений всех технологических параметров. Например, для скоростной электротермовакуумной установки в режиме сушки до пропитки нужно выбрать значения глубины вакуума p, времени создания вакуума $t_в$, температуры T_c. Такая трактовка режима работы технологической установки неразрывно связана с особенностью оптимизируемого процесса, заключающейся в том, что оптимальное значение рассматриваемого параметра в общем случае может меняться в зависимости от значений нескольких других параметров. Таким образом, можно сказать, что к характеристикам технологического процесса могут предъявляться требования как независимости по отношению к другим, так и зависимости. Первое из них мы использовали при описании технологического процесса с точки зрения однозначности его задания, как того требует математика. Второе из них мы будем использовать по отношению к условиям работы промышленных установок с точки зрения оптимизации режимов их работы.

В [112] описаны постановки задачи оптимизации режимов работы для технологической установки, функционирование которой базируется на использовании на всех трех этапах метода скоростного вакуумирования. При этом для оптимизации режимов сушки до и после пропитки берется время достижения заданного уровня суммарных показателей качества, а для оптимизации режимов пропитки отслеживается значение этих показателей. Значение обобщенного диагностического параметра максимизируется для всех этапов технологического процесса. Для каждого технологического параметра предлагается индивидуальная постановка задачи оптимизации, что без дополнительной конкретизации условий оптимизации вызывает неопределенность при решении задачи. Другим недостатком является применимость такой постановки только при оптимизации режимов конкретного метода и невозможность ее распространения на другие. Следует также отметить тот факт, что использование для характеристики качества времени достижения заданного уровня суммарных показателей качества некорректно, поскольку время протекания процесса – один из основных технологических параметров сушки. Решение задачи оптимизации для постановки такого вида позволяет находить оптимальное время протекания процесса в зависимости от значений других технологических параметров.

Создавшееся положение может быть изменено путем глобализации постановок задач и их объединением для каждого технологического параметра в одну. При этом для оптимизации режимов сушки до и после пропитки вместо минимизации времени достижения заданного уровня суммарного критерия качества необходимо использовать минимизацию затрат на режим. Основным условием для возможности решения задач оптимизации при применении такой стратегии является завершенность физико-химических процессов, заключающаяся в полном удалении паров растворителей и запекании лаковой пленки при сушке после пропитки и полном удалении влаги при сушке до пропитки. Для определения рациональных режимов пропитки статоров ЭД вместо максимизации ОДП предлагается для всех этапов процесса использовать стратегию максимизации нормированного разностного диагностического параметра или минимизацию затрат на обеспечение режима работы технологической установки. В результате использования скоростного электротермовакуумного метода на всех этапах технологического процесса могут быть получены следующие постановки задач оптимизации [15, 440]:

при сушке до пропитки

$$\min\{З_{\text{реж}}(p, t_в, t_c, T_c, N_{в.у})\} \text{ при } \overline{\Psi}_{\text{III}\,зад} \le \overline{\Psi}_{\text{III}}; \tag{4.20}$$

$$\max\{\overline{\Psi}_{\text{III}}(p, t_в, t_c, T_c, N_{в.у})\} \text{ при } З_{\text{реж}} \le З_{\text{реж.}зад}; \tag{4.21}$$

при пропитке

$$\max\{\overline{\Psi}_{\text{IV}}(p, t_в, t_{пр}, T_{пр}, N_{в.у}, B, M_{\text{лак}})\} \text{ при } З_{\text{реж}} \le З_{\text{реж.}зад}; \tag{4.22}$$

$$\min\{З_{\text{реж}}(p, t_в, t_{пр}, T_{пр}, N_{в.у}, B, M_{\text{лак}})\} \text{ при } \overline{\Psi}_{\text{IV}\,зад} \le \overline{\Psi}_{\text{IV}}, \tag{4.23}$$

где $З_{\text{реж}}$ – затраты на реализацию заданного режима; $З_{\text{реж.}зад}$ – заданный уровень затрат на реализацию режимов; B и $M_{\text{лак}}$ – вязкость и марка лака соответственно; $\overline{\Psi}_{\text{III}}$ и $\overline{\Psi}_{\text{IV}}$ – соответственно значения нормированного диагностического параметра для этапов сушки до пропитки и пропитки.

Постановки задач оптимизации для сушки после пропитки обмоток электрических двигателей формируются аналогичным образом. В случае обобщения вышеприведенных постановок задач их можно применять для оптимизации режимов при использовании различных методов.

4.3.3 Представление технологического процесса восстановления изоляции обмоток в пространственной модели оптимизации

При использовании обычных способов описания однозначное определение технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей, а также последующая оценка качества конечного продукта представляют некоторую трудность. Так, многообразные методы восстановления по стадиям технологии ремонта имеют различный набор параметров процесса, все или часть из которых специфичны, т. е. находят отражение в данном конкрет-

ном методе. Введем понятия единичной технологии, технологического пути, этапа технологического процесса и рассмотрим подход, позволяющий преодолеть названные трудности.

Единичной технологией ремонта электрических двигателей будем называть технологию, имеющую на каждом из этапов строго определенные значения параметров. Отличие хотя бы в одном из значений параметров какого-либо этапа дает возможность получить другую единичную технологию.

В свою очередь, технологический путь – это прохождение электродвигателя через технологический процесс восстановления, отвечающее единичной технологии. Этап технологического процесса – часть процесса, имеющая свое индивидуальное назначение и играющая значительную роль во всем процессе.

Описание единичных технологий требует раскрытия понятия «технологический параметр». Для этого рассмотрим вектор $\hat{x}$, имеющий в общем случае следующую структуру

$$\hat{x} = (x_1,...,x_n, x_{n+1},...,x_m), \tag{4.24}$$

где $x_1 ... x_m$ – некоторые факторы, оказывающие воздействие на технологический процесс, которые можно разделить на две большие группы:

– фиксируемые (варьируемые) факторы $x_1 ... x_n$;

– нефиксируемые факторы $x_{n+1} ... x_m$.

В этом случае технологическими параметрами будем называть фиксируемые факторы, вектор которых $\bar{x}$ примет вид

$$\bar{x} \subset \hat{x}; \quad \bar{x} = (x_1,...,x_n), \tag{4.25}$$

где n – количество технологических параметров.

Каждый из этапов технологического процесса, как уже указывалось, может осуществляться различными методами. В каждом из методов технологические параметры принимают различные значения. Из этого следует, что существует множество единичных технологий, поскольку технологические параметры вызывают различия на всех этапах рассматриваемого процесса. Следовательно, можно говорить о технологическом пространстве, которое составляют единичные технологии, а параметры технологического процесса выполняют роль координат. Описание единичной технологии с помощью координат технологического пространства приведено ниже.

Для характеристики технологии восстановления изоляции обмоток наиболее удачным вариантом может служить ее описание с помощью идентификационного номера. Суть такого описания состоит в том, что вместо перечисления значений технологических параметров записываются числа, соответствующие этим технологическим параметрам. При этом данное описа-

ние получается менее громоздким, а внешний вид идентификационного номера принимает более привлекательную форму вследствие однообразия его элементов.

На исследуемую электроизоляционную систему воздействуют две группы факторов: способствующие разрушению изоляции и утере ею диэлектрических свойств при эксплуатации и направленные на восстановление свойств изоляции. Множество факторов первой группы обозначим за X, второй – U. При этом множество U охватывает существующие технологии восстановления изоляции не только при капитальном ремонте ЭД, но и при его техническом обслуживании и ремонтах в ходе эксплуатации.

Сформировать пространственную модель оптимизации параметров процесса пропитки и сушки изоляции двигателей, представленную на рисунке 4.7, позволяет систематизация технологий восстановления ЭД, условий эксплуатации, параметров эффективности технологического процесса. В состав модели входят: пространство параметров процесса восстановления изоляции ЭД, пространство факторов, характеризующих условия эксплуатации двигателей, пространство показателей состояния (качества) изоляции, пространство показателей затрат и функциональное пространство.

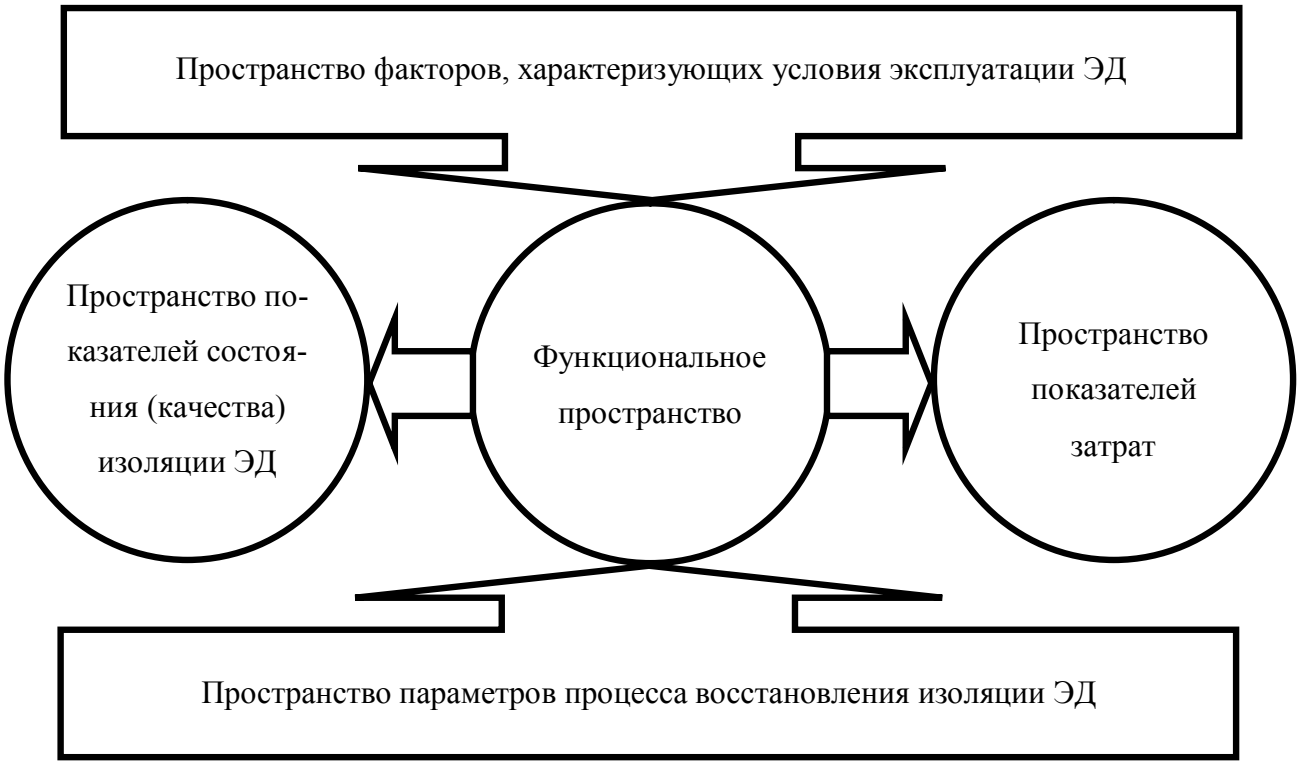


Рисунок 4.7 – Пространственная модель оптимизации параметров процесса пропитки и сушки изоляции электрических двигателей

Каждое из названных пространств имеет собственную внутреннюю структуру, что, в общем случае, выражается в наличии нескольких подпро-

странств. Деление на подпространства отсутствует лишь у пространства эксплуатации электродвигателей.

В соответствии с терминологией теории планирования экспериментов пространства, содержащие входные контролируемые и управляемые либо контролируемые, но неуправляемые переменные, будем называть факторными [314, 441]. В рассматриваемом случае ими будут являться пространство факторов, характеризующих условия эксплуатации двигателей, и пространство параметров процесса восстановления изоляции ЭД. Пространства, содержащие выходные показатели модели, будем называть пространствами реакции или отклика. В данном случае это пространства состояния (качества) изоляции и затрат. Функциональное пространство выполняет роль связующего звена между факторными пространствами и пространствами реакции.

Использование пространственной модели оптимизации параметров процесса пропитки и сушки изоляции электродвигателей возможно при выполнении следующих условий: на объект исследования одновременно могут воздействовать факторы, содержащиеся либо в пространстве эксплуатации электродвигателя, либо в одном из подпространств пространства восстановления изоляции; существует строгий порядок очередности действия групп факторов.

Описание конкретной единичной технологии возможно с использованием ряда, обозначающего методы и значения технологических параметров, а также идентификационного номера. При использовании ряда последовательно записываются название метода, количество циклов или ступеней (если технологический процесс имеет несколько циклов или ступеней), значения технологических параметров. В результате составления такого ряда получается последовательность слов и цифр, характеризующих технологический этап. Если технологический процесс сложный, то этот ряд может занять несколько строк, что не совсем удобно.

Наиболее приемлемым для характеристики технологии восстановления изоляции электродвигателя является описание с помощью идентификационного номера. Суть такого описания по отношению к технологиям пропитки и сушки изоляции ЭД рассмотрена в [112]. При этом необходимо разделять идентификационный номер фазы технологии и полный идентификационный номер ремонта.

Идентификационным номером фазы технологии ремонта называется ряд разделенных последовательно записанных чисел, содержащих информацию о применяемом методе и значениях его технологических параметров. Полный идентификационный номер ремонта – это совокупность идентификационных номеров фаз технологии, записанных в хронологической последовательности, т. е. в порядке осуществления этапов технологического процесса ремонта изоляции. В общем виде это можно записать следующим образом:

$$N = [N^{\mathrm{I}}; N^{\mathrm{II}}; N^{\mathrm{III}}; N^{\mathrm{IV}}; N^{\mathrm{V}}; N^{\mathrm{VI}}] , \qquad (4.26)$$

где N – полный идентификационный номер технологии ремонта; N^{I} – идентификационный номер разрушения связующего; N^{II} – идентификационный номер обмоточно-изолировочных работ; N^{III} – идентификационный номер сушки до пропитки; N^{IV} – идентификационный номер пропитки; N^{V} – идентификационный номер сушки после пропитки; N^{VI} – идентификационный номер условий эксплуатации.

Каждый идентификационный номер фазы имеет свою структуру. Входящие в его состав числа названы индексными номерами. Существует два вида индексных номеров: однородные и неоднородные. Общий вид идентификационного номера фазы записывается как

$$N^{k}=[m_1, \dots, m_i, \dots, m_n / n_1, \dots, n_j, \dots, n_l], \qquad (4.27)$$

где m_i – неоднородный индексный номер; n_j – однородный индексный номер.

Если говорить об однородном индексном номере, то он условно показывает значение технологического параметра при применении того или иного метода. Индексные номера являются положительными целыми числами, каждому из которых соответствует строго заданное значение технологического параметра. Однородными эти номера названы потому, что они характеризуют величины одного иерархического уровня, самого нижнего.

В свою очередь, неоднородные индексные номера, в отличие от однородных, отражают характеристики разных иерархических уровней. Они определяют метод производства работ и количество циклов. Следует отметить, что такой иерархический уровень, как количество циклов, может отсутствовать вследствие наличия только одного цикла у применяемого метода.

Анализ структуры идентификационных номеров технологии восстановления изоляции обмоток электрических машин позволил в качестве примера составить полный идентификационный номер для наиболее простой единичной технологии ремонта двигателя.

Предположим, что электродвигатель с коэффициентом заполнения пор $K_{зп}$ = 0,8 (n_2 = 2) эксплуатировался в среде с относительной влажностью φ = 80 % (n_3 = 3) и проходит техническое обслуживание. Для сушки до пропитки будем использовать конвекционный метод (m_1 = 3) со следующими значениями технологических параметров: температура T_c = 130 °С (n_1 = 2), время сушки t_c = 6 ч (n_2 = 4), скорость циркуляции воздуха v = 10 м/с (n_3 = 3). Пропитка осуществляется методом однократного погружения (m_1 = 3, m_2 = 1) лаком МЛ-92 (n_1 = 2) с вязкостью B = 40 с (n_2 = 5). Значения технологических параметров следующие: время пропитки $t_{пр}$ = 15 мин (n_3 = 3), температура $T_{пр}$ = 160 °С (n_4 = 3), время стекания лака $t_{ст.л}$ = 30 мин (n_5 = 3). Сушку после пропитки проведем в одну ступень токовым методом (m_1 = 5, m_2 = 1, m_3 = 1) со следующими технологическими параметрами: температура T_c = 150 °С (n_1 = 6), время сушки t_c = 8 ч (n_2 = 6).

Тогда полный идентификационный номер примет следующий вид

$$N = [2/2,3;\ 3/2,4,3;\ 3,1/2,5,3,3,3;\ 5,1,1/6,6].$$

4.3.4 Методики оптимизации параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей

Проблема выбора методов оптимизации для решения конкретных практических задач является актуальной, во-первых, потому, что разные методы решения оптимизационных задач обеспечивает различную точность, а, во-вторых, каждый метод обладает той или иной сложностью вычислительного процесса.

Протекающие в изоляции электрических машин процессы ее старения и восстановления достаточно сложны, в связи с чем они описываются нелинейными уравнениями. Задачи такого вида могут быть решены двумя способами: с использованием методов нелинейного программирования и сплошным перебором рассматриваемых вариантов. При этом число вариантов напрямую зависит от степени дискретизации значений факторов, которая может быть увеличена (при этом произойдет увеличение количества вариантов) или уменьшена. Однако, если представить функцию как дискретную, то в отношении ее могут использоваться методы целочисленного программирования. Такое разнообразие возможных групп методов решения задач оптимизации вызывает необходимость оценки их достоинств и недостатков с целью определения наиболее эффективного из них.

Применение методов нелинейного программирования для решения задач первой группы наиболее рационально. В пользу данного решения говорит следующее. Методы сплошного перебора и целочисленного программирования имеют дело с ограниченным количеством значений исследуемой функции. В случае необходимости повышения эффективности использования этих методов требуется увеличить степень дискретизации значений функции. Это вызовет резкое увеличение набора обрабатываемой информации, а, следовательно, и времени на ее обработку. Последнее обстоятельство в настоящее время не имеет существенного значения, поскольку в условиях применения современных ЭВМ эти затраты времени сокращены до минимума. Однако довольно много времени занимает подготовка специального программного обеспечения и ввод обрабатываемой информации. В данном аспекте достоинство большинства методов нелинейного программирования – возможность их ручного расчета.

Следует отметить, что на современном этапе развития математической теории оптимизации существует ограниченное число методов, позволяющих найти экстремумы нелинейных функций при наличии ограничений. В основном эти методы связаны с определенными допущениями, что несколько снижает точность и эффективность получаемого решения [435]. Анализ литературных источников [434, 435, 442] позволил выбрать для решения задач первой группы метод штрафных функций, который является наиболее простым среди методов

нелинейного программирования.

Задачи оптимизации второй группы представляют собой задачи комбинаторной оптимизации. Они могут быть решены с использованием методов ветвей и границ, сплошным перебором вариантов. Наиболее эффективно эти задачи решаются с помощью методов динамического программирования, которые и были использованы при проведении исследования [432, 442, 443].

В свою очередь, задачи оптимизации третьей группы, несмотря на наличие ограничений, – самые простые. Связано это с малым количеством вариантов технологического процесса, с которыми сравнивается значение параметра, характеризующее условия эксплуатации электродвигателя.

4.3.4.1 Методика выбора оптимального режима функционирования установок по пропитке и сушке изоляции

Идея метода штрафных функций состоит в преобразовании задачи минимизации (максимизации) некоторой функции $\Xi = f(\bar{s})$ (где $\bar{s}$ – вектор входных переменных) с соответствующими ограничениями, наложенными на $\bar{s}$, в задачу поиска минимума (максимума) без ограничений функции [435]

$$\xi = f(\bar{s}) \pm \aleph(\bar{s}), \tag{4.28}$$

где функция $\aleph(\bar{s})$ является штрафной.

При нарушении ограничений она «штрафует» функцию ξ, т. е. уменьшает ее значение. В этом случае максимум ξ будет находиться внутри области ограничений. Функция $\aleph(\bar{s})$, удовлетворяющая этому условию, может быть не единственной [435].

Последовательность решения задач оптимизации методом штрафных функций в общем виде выглядит следующим образом:

- преобразовать исходную задачу с ограничениями в задачу без ограничений путем прибавления к исходной функции цели штрафной функции;
- найти частные производные полученной функции ξ;
- решить систему уравнений, образуемую частными производными, и найти множество значений переменных;
- подставить найденные значения переменных в исходное уравнение функции ξ и определить ее экстремальное значение.

Задачу минимизации $З^{m}_{реж}(\bar{u})$ в нашем случае необходимо решить при ограничении $\overline{Ш}_{m}(\bar{u}) - \overline{Ш}_{m.зад}(\bar{u}) \geq 0$, где m – номер этапа технологического процесса. Среди рекомендованных к использованию видов функции $\aleph(\bar{u})$, представленных в [434, 435], выберем наиболее удобный для решения поставленных задач [389]

$$\aleph(\bar{u}) = \frac{r}{\overline{Ш}_m(\bar{u}) - \overline{Ш}_{m.зад}(\bar{u})}, \tag{4.29}$$

где r – параметр штрафной функции.

Тогда функция $З'_{реж.т}(\bar{u},r)$ примет вид

$$З'_{реж.т}(\bar{u},r) = З_{реж.т}(\bar{u}) + \frac{r}{\overline{Ш}_m(\bar{u}) - \overline{Ш}_{m.зад}(\bar{u})}. \tag{4.30}$$

Если составляющие вектора $\bar{u}$ принимают допустимые значения, т. е. значения, для которых $\overline{Ш}_m(\bar{u}) - \overline{Ш}_{m.зад}(\bar{u}) \geq 0$, то $З'_{реж.т}(\bar{u},r)$ принимает значения, которые больше соответствующих значений $З_{реж.т}(\bar{u})$, и разность можно уменьшить за счет того, что r имеет очень малое значение. Если $\bar{u}$ принимает значения, которые хотя и являются допустимыми, но близки к границе области ограничений, и, по крайней мере, одна из функций $\overline{Ш}_m(\bar{u}) - \overline{Ш}_{m.зад}(\bar{u})$ близка к нулю, то значения функции $\aleph(\bar{u})$ и, следовательно, значения функции $З'_{реж.т}(\bar{u},r)$ станут очень велики. Таким образом, влияние функции $\aleph(\bar{u})$ состоит в создании «гребня с крутыми краями» вдоль каждой границы области ограничений. Значит, если поиск начинается из допустимой точки и осуществляется поиск минимума функции $З'_{реж.т}(\bar{u},r)$ без ограничений, то минимум, конечно, будет достигаться внутри допустимой области для задачи с ограничениями. Полагая значение r достаточно малым с целью снижения влияния $\aleph(\bar{u})$ в точке минимума, мы можем сделать точку минимума функции $З'_{реж.т}(\bar{u},r)$ без ограничений совпадающей с точкой минимума функции $З_{реж.т}(\bar{u})$ с ограничениями [435].

Примем за $\bar{u}^*$ – вектор, соответствующий минимуму функции $З_{реж.т}(\bar{u})$. Поскольку $З_{реж.т}(\bar{u})$ непрерывная функция и $З_{реж.т}(\bar{u}^*) \leq З_{реж.т}(\bar{u})$ для всех допустимых точек, то, задав достаточно малое значение ϖ, можно найти допустимую точку, описываемую вектором $\bar{u}'$, такую, что

$$З_{реж.т}(\bar{u}') < З_{реж.т}(\bar{u}^*) + \frac{\varpi}{2}. \tag{4.31}$$

Так как r_k – убывающая последовательность, стремящаяся к нулю, можно найти такое значение K, что для $k \geq K$ справедливо неравенство

$$r_k \leq \left\{ \frac{\varpi}{2} \cdot \min\left[\frac{1}{\overline{\Psi}_m(\bar{u}') - \overline{\Psi}_{m.зад}(\bar{u}')} \right] \right\}. \tag{4.32}$$

Учитывая, что $\aleph(\bar{u}) > 0$, из определения функции $З'_{реж.т}(\bar{u},r)$, получим

$$З_{реж.т}(\bar{u}^*) \le \min\ З'_{реж.т}(\bar{u},r_k) = З'_{реж.т}(\bar{u}_k^*,r_k), \tag{4.33}$$

где $\bar{u}_k^*$ – вектор, описывающий точку минимума функции $З'_{реж.т}(\bar{u},r_k)$ для задачи без ограничений.

Если $k > K$, то $r_k < r_K$ и справедливо неравенство

$$З'_{реж.т}(\bar{u}_k^*,r_k) \le З'_{реж.т}(\bar{u}_K^*,r_K), \tag{4.34}$$

откуда следует, что поскольку $\bar{u}_k^*$ минимизирует функцию $З'_{реж.т}(\bar{u},r_k)$ в любой точке множества U_2, в частности, в точке, описываемой вектором $\bar{u}_K^*$, функция будет принимать значение, большее, чем $З'_{реж.т}(\bar{u}_k^*,r_k)$.

Тогда

$$\begin{aligned} З'_{реж.т}(\bar{u}_K^*,r_K) &= З_{реж.т}(\bar{u}_K^*) + \frac{r_K}{\bar{Ш}_m(\bar{u}_K^*) - \bar{Ш}_{т.зад}(\bar{u}_K^*)} > \\ &> З_{реж.т}(\bar{u}_K^*) + \frac{r_k}{\bar{Ш}_m(\bar{u}_K^*) - \bar{Ш}_{т.зад}(\bar{u}_K^*)}, \end{aligned} \tag{4.35}$$

поскольку $r_k < r_K$.

Следовательно

$$З'_{реж.т}(\bar{u}_K^*,r_k) < З'_{реж.т}(\bar{u}_K^*,r_K). \tag{4.36}$$

Тогда

$$З_{реж.т}(\bar{u}^*) \le З'_{реж.т}(\bar{u}_k^*,r_k) \le З'_{реж.т}(\bar{u}_K^*,r_k) < З'_{реж.т}(\bar{u}_K^*,r_K). \tag{4.37}$$

Но т. к. значение $\bar{u}_K^*$ минимизирует функцию $З'_{реж.т}(\bar{u},r_K)$, то

$$З'_{реж.т}(\bar{u}_K^*,r_K) \le З'_{реж.т}(\bar{u}',r_K) = З_{реж.т}(\bar{u}') + \frac{r_K}{\bar{Ш}_m(\bar{u}') - \bar{Ш}_{т.зад}(\bar{u}')}. \tag{4.38}$$

Опуская промежуточные преобразования на основе выражений (4.32), (4.37) и (4.38), из уравнения (4.31) получим

$$З_{реж.т}(\overline{u}^*) \le З'_{реж.т}(\overline{u}_k^*, r_k) < З_{реж.т}(\overline{u}^*) + \frac{\varpi}{2} + \frac{\varpi}{2}; \quad (4.39)$$

$$З'_{реж.т}(\overline{u}_k^*, r_k) - З_{реж.т}(\overline{u}^*) < \varpi. \quad (4.40)$$

Поскольку ϖ может быть выбрано произвольно малым, всегда можно найти такое значение k, при котором

$$З_{реж.т}(\overline{u}^*) < З'_{реж.т}(\overline{u}_k^*, r_k) < З_{реж.т}(\overline{u}^*) + \varpi. \quad (4.41)$$

Таким образом, при $k \to \infty$ $(r_k \to 0)$

$$\lim_{r_k \to 0} З'_{реж.т}(\overline{u}_k^*, r_k) = З_{реж.т}(\overline{u}^*); \quad (4.42)$$

$$З_{реж.т}(\overline{u}_k^*) \to З_{реж.т}(\overline{u}^*); \quad (4.43)$$

$$\frac{r_k}{\overline{Ш}_m(\overline{u}_k^*) - \overline{Ш}_{m.зад}(\overline{u}_k^*)} \to 0. \quad (4.44)$$

Данное условие необходимо для обеспечения минимального значения функции именно в искомой точке. Применительно к задаче максимизации $\overline{\Psi}_m(\overline{u})$ при ограничении $З_{реж.т}(\overline{u}) \le З_{реж.т.зад}(\overline{u})$ выражение (4.38) запишется следующим образом

$$\overline{Ш}'_m(\overline{u}, r) = \overline{Ш}_m(\overline{u}) - \frac{r}{З_{реж.т.зад}(\overline{u}) - З_{реж.т}(\overline{u})}. \quad (4.45)$$

В данном случае функция штрафа $\aleph(\overline{u})$ снижает значение $\overline{\Psi}'_m(\overline{u}, r)$. В отношении выражения (4.45) справедливы те же выкладки, что и к выражению (4.30).

Необходимость нахождения частных производных оптимизируемых функций $\frac{\partial\left(З'_{реж.т}(\overline{u}, r)\right)}{\partial u_w}$ и $\frac{\partial\left(\overline{Ш}'_m(\overline{u}, r)\right)}{\partial u_w}$, где w – номер технологического параметра, и последующего решения полученных уравнений объясняется тем, что в классическом анализе справедливость выражений $\frac{\partial\left(З'_{реж.т}(\overline{u}, r)\right)}{\partial u_w} = 0$ и $\frac{\partial\left(\overline{Ш}'_m(\overline{u}, r)\right)}{\partial u_w} = 0$ является необходимым условием наличия у функции экстремума. Решение этих уравнений должно быть сведено к виду $u_w(r)$. В дальнейшем в уравнения для $З'_{реж.т}(\overline{u}, r)$ и $\overline{Ш}'_m(\overline{u}, r)$ подставляются найденные значения $u_w(r)$. После упрощения полученного выражения r устремляется

к нулю и находится максимальное и минимальное значения рассматриваемой функции [389].

Блок-схема оптимизации режимов работы технологической установки представлена на рисунке 4.8. В первую очередь, выбирается этап и метод пропитки или сушки, с использованием которого функционирует установка. Для этого этапа и метода находится соответствующая математическая модель (блок 1). При выборе сушки до или после пропитки (блок 2) в соответствии с постановкой задачи минимизации затрат при ограничении величины $\overline{\Psi}_m$ (блок 3) производится преобразование задачи с ограничением в задачу без ограничения (блок 5), что определяется выражением (4.30).

В дальнейшем находятся частные производные полученной функции по каждому из технологических параметров. Они приравниваются к нулю и объединяются в систему, после чего система уравнений решается (блок 7). Значения технологических параметров в функции r подставляются в исходное выражение преобразованной функции, записанной в блоке 5, после чего r устремляется к нулю и находятся минимальные значения затрат на создание оптимального режима (блок 9).

При определении оптимальных режимов работы технологической установки при пропитке изделий после выбора метода пропитки (блок 1) принимается решение об используемой стратегии оптимизации (блок 2). При выборе стратегии минимизации затрат при ограничении $\overline{\Psi}_m$ (блок 3) выбор оптимального варианта осуществляется аналогично оптимизации режимов сушки до и после пропитки (блоки 5, 7, 9). В случае оптимизации режимов пропитки при максимизации $\overline{\Psi}_m$ с ограничением затрат на создание режима (блок 4) производится преобразование исходной задачи с ограничением в задачу без ограничения в соответствии с формулой (4.45) (блок 6). В дальнейшем находятся частные производные полученной функции по каждому из технологических параметров. Они приравниваются к нулю и объединяются в систему, после чего данная система уравнений решается (блок 8). Значения технологических параметров в функции r подставляются в исходное выражение преобразованной функции, записанной в блоке 6, после чего r устремляется к нулю и находится максимальное значение $\overline{\Psi}_m$, характеризующее оптимальный режим (блок 10).

Нахождение оптимального набора методов единой технологии восстановления изоляции строится на использовании динамического программирования, которое можно определить как метод оптимизации многошаговых процессов принятия решений, позволяющее указать пути решения целого класса экстремальных задач [442].

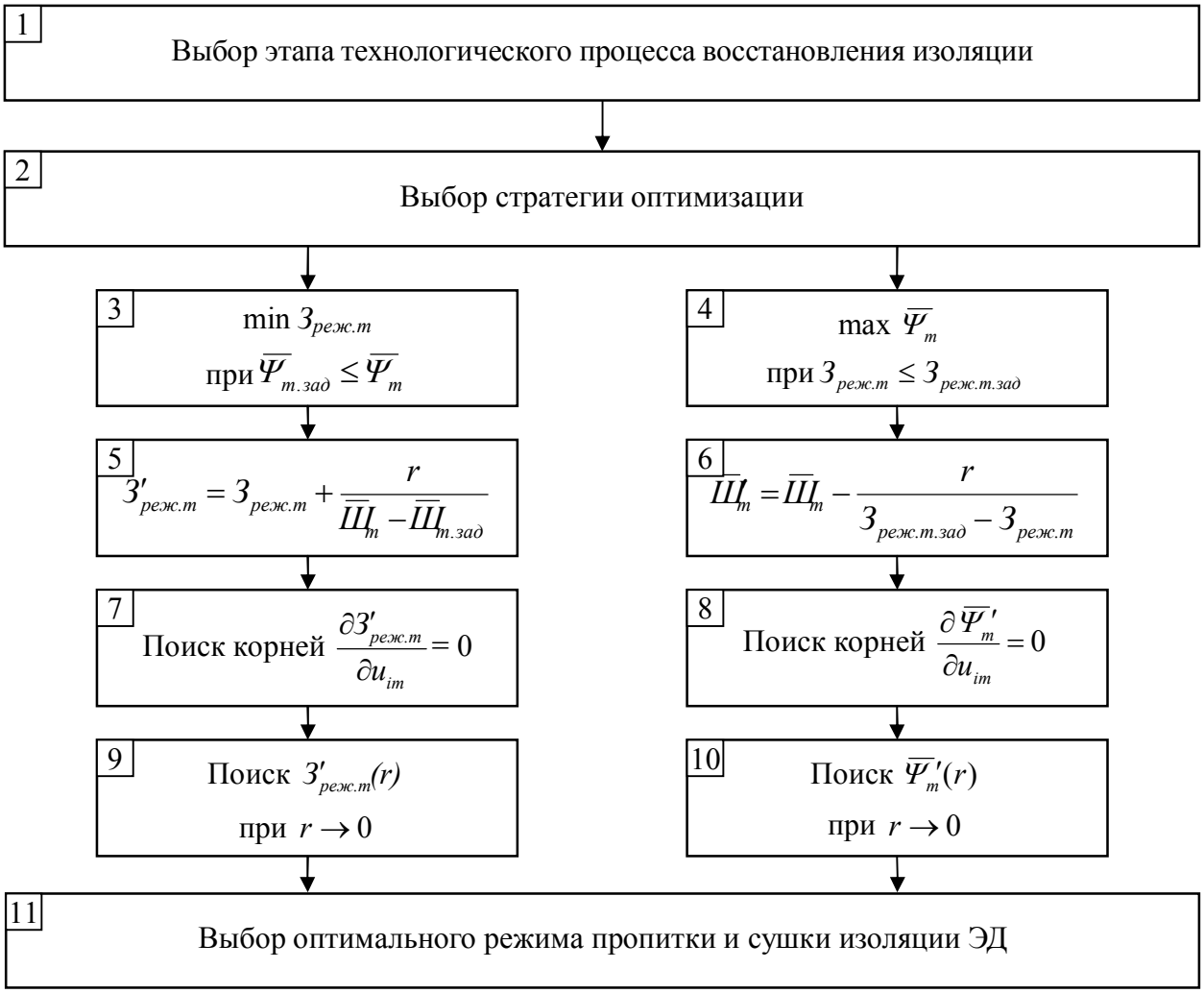


Рисунок 4.8 – Блок-схема оптимизации режимов функционирования технологической установки по пропитке и сушке изоляции ЭД

4.3.4.2 Методика выбора оптимального набора методов в едином технологическом процессе восстановления изоляции

В рассматриваемом случае оптимальное сочетание методов, применяемых на различных этапах процесса восстановления изоляции ЭД, будем искать при условии известных оптимальных режимов работы технологических установок для каждого метода на всех стадиях ремонта. Процесс принятия решений можно разбить на три части: выбор метода сушки до пропитки; выбор метода пропитки и выбор метода сушки после пропитки. Пусть действия, совершаемые на φ-м шаге ($1 \le \varphi \le 3$), характеризуются некоторой совокупностью показателей $\Theta_{\varphi т}$, а состояние процесса к началу этого шага – параметрами ($t_{рем.т}$, $\widetilde{\Psi}_{т}$, $З_{рем.т}$) = $Y_{т}$. Обычно действия $\Theta_{\varphi т}$ не являются произвольными, а зависят от состояния $Y_{т}$, которое возникло перед φ-м шагом, т. е. $\Theta_{\varphi т} = \Theta_{\varphi т}(Y_{т})$. В свою очередь, значения параметров эффективности после следующего этапа технологического процесса будут определяться принятым решением, т. е.

$Y_{m+1}(\Theta_{em})$. Появляется идея провести оптимизацию поэтапно, анализируя последовательно каждый шаг процесса в поисках наилучших вариантов его продолжения. В этом состоит особенность метода – в возможности разбиения процесса принятия решений на ряд однотипных шагов или этапов, каждый из которых планируется отдельно, но с учетом результатов, полученных на других шагах [442].

С учетом изложенного на основе принципов динамического программирования было установлено, что для решения поставленной задачи оптимизации необходимо принять последовательно три оптимальных решения. Реализуя принцип оптимальности, метод динамического программирования позволяет решить поставленные задачи, анализируя ход исследуемого процесса начиная с момента его окончания и последовательно перемещаясь к его началу [444]. Недостатком метода динамического программирования является отсутствие единого алгоритма решения задач, в связи с чем необходимо, основываясь на принципе оптимальности, решать каждую задачу, разрабатывая собственный алгоритм [442, 444].

Следует заметить, что в рассматриваемом случае параметр состояния системы является векторным, а это затрудняет решение поставленной задачи оптимизации в связи с тем, что возрастает количество возможных вариантов технологий и значений векторного параметра состояния системы. Некоторое упрощение задачи было достигнуто при ее постановке, поскольку количество оптимизируемых критериев сокращено до одного, а на значения остальных наложены ограничения. Другим упрощением решаемой задачи стало то, что поиск оптимального сочетания методов сушки до и после пропитки производится для какого-то определенного метода пропитки, а все остальные из рассмотрения исключаются.

Так как в ходе проведения технологических операций невозможно определить $\widetilde{\Psi}$, для решения задач оптимизации с использованием динамического программирования необходимо было осуществить некоторые математические преобразования, позволяющие использовать для решения задач вместо $\widetilde{\Psi}$ параметр $\overline{\Psi}_m$.

Разработанная при непосредственном участии автора методика выбора оптимального сочетания методов пропитки и сушки при восстановлении изоляции позволяет решать задачи всех трех рассмотренных выше типов. При этом в качестве исходных данных использовались значения показателей качества оптимальных режимов пропитки, сушки до и после пропитки.

В соответствии с методикой выбирается метод пропитки изоляции, для которого в дальнейшем будут подбираться оптимальные методы сушки до и после пропитки. Далее, с учетом требований к технологическому процессу, выбирается соответствующая постановка задачи оптимизации. При выборе стратегии минимизации времени ремонта при ограничении затрат на ремонт и величины $\widetilde{\Psi}$ производится отбор вариантов сушки после пропитки по условию ограничения затрат: определяются величины затрат на ремонт, времени процесса и $\overline{\Psi}_{\mathrm{IV+V}}$

. С целью сокращения числа рассматриваемых вариантов выбирается три варианта с минимальным временем ремонта по совокупности пропитки и сушки после пропитки. Рассчитываются значения времени ремонта, затрат и нормированного разностного диагностического параметра для сушки до пропитки, пропитки и сушки после пропитки. Производится отбор вариантов, удовлетворяющих условиям ограничения затрат и величины $\overline{\Psi}_{\text{III+IV+V}}$. Из оставшихся вариантов выбирается один с наименьшим временем ремонта.

При выборе стратегии минимизации затрат на ремонт при ограничении времени ремонта и величины $\widetilde{\Psi}$ отбираются варианты сушки после пропитки по условию ограничения затрат. Определяются величины затрат, времени процесса и $\overline{\Psi}_{\text{IV+V}}$. Отбираются варианты по условию ограничения времени ремонта. Для сокращения числа рассматриваемых вариантов проводится выбор трех вариантов с минимальным временем ремонта по совокупности пропитки и сушки после пропитки. Рассчитываются значения времени ремонта, затрат и нормированного разностного диагностического параметра для сушки до пропитки, пропитки и сушки после пропитки. Осуществляется отбор вариантов, удовлетворяющих условиям ограничения времени ремонта и величины $\overline{\Psi}_{\text{III+IV+V}}$. Из оставшихся вариантов выбирается один, характеризующийся наименьшими затратами на ремонт.

На следующем этапе, после выбора стратегии максимизации величины $\widetilde{\Psi}$ при ограничении затрат на ремонт и времени ремонта, отбираются варианты сушки после пропитки по условиям ограничения затрат и времени ремонта, а также определяются величины затрат, времени процесса и $\overline{\Psi}_{\text{IV+V}}$. Для совокупности сушки после пропитки и пропитки отбираются варианты по условиям ограничения затрат на ремонт и времени ремонта. Для ограничения числа рассматриваемых вариантов производится отбор трех вариантов с максимальным $\overline{\Psi}_{\text{IV+V}}$ по совокупности пропитки и сушки после пропитки. Далее рассчитываются значения времени ремонта, затрат и нормированного разностного диагностического параметра для сушки до пропитки, пропитки и сушки после пропитки. Производится отбор вариантов, удовлетворяющих условиям ограничения затрат и времени ремонта. Из оставшихся вариантов выбирается один с наибольшей величиной $\overline{\Psi}_{\text{III+IV+V}}$. Для получения величины $\widetilde{\Psi}$, характеризующей каждую из полученных оптимальных технологий, необходимо произвести обратное преобразование в соответствии с формулами, приведенными в третьем разделе монографии.

4.3.4.3 Методика выбора оптимальной технологии пропитки и сушки для конкретных условий эксплуатации двигателей

По реализации процедур сравнения метод сплошного перебора вариантов наиболее прост. В случае решения задач с ограничениями он заключается в последовательном отборе вариантов, удовлетворяющих поставленным условиям. В соответствии с этими положениями разработана блок-схема выбо-

ра оптимальной технологии пропитки и сушки изоляции в зависимости от конкретных условий эксплуатации ЭД, приведенная на рисунке 4.9.

Согласно данной блок-схеме, прежде всего рассчитываются значения нормированного диагностического параметра и единого экономического критерия, которые характеризуют эффективность использования каждой технологии восстановления изоляции применительно к заданным условиям эксплуатации (блок 1). В качестве времени ремонта принимаются значения, полученные при оптимизации сочетания методов на различных этапах ремонта. Для дальнейшего решения задачи оптимизации проводится выбор стратегии оптимизации, который обусловлен практической необходимостью выбора технологии [389].

Рисунок 4.9 – Блок-схема выбора оптимальной технологии пропитки и сушки изоляции для конкретных условий эксплуатации ЭД

При выборе стратегии минимизации единого экономического критерия и ограничении нормированного диагностического параметра и времени ремонта (блок 2) производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения времени ремонта (блок 5) и минимального срока службы (блок 8). Из ос-

тавшихся выбирается вариант с минимальным значением единого экономического критерия (блок 11).

При выборе стратегии максимизации нормированного диагностического параметра и ограничении значений единого экономического критерия и времени ремонта (блок 3) проводится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения единого экономического критерия (блок 6) и времени ремонта (блок 9). Из оставшихся выбирается вариант с максимальным значением $\widetilde{\Psi}$ (блок 11). При выборе стратегии минимизации времени ремонта и ограничении $\widetilde{\Psi}$ и единого экономического критерия (блок 4) выполняется последовательный отбор вариантов по условиям ограничения значений единого экономического критерия (блок 7) и минимального $\widetilde{\Psi}$ (блок 10). Из оставшихся выбирается вариант с минимальным значением времени ремонта (блок 11).

4.3.4.4 Рекомендации по выбору параметров восстановления изоляции обмоток электрических двигателей

Главной проблемой при решении конкретных производственных задач на основе разработанных методик оптимизации остается использование разумных ограничений. Основными требованиями, предъявляемыми к ограничениям в задачах оптимизации, являются обеспечение законченности процесса и реализуемость решения с использованием заданных ограничений. Приведенные рекомендации разработаны на основе стратегии минимизации экономических критериев [367].

На производственно-ремонтном предприятии Алтайэнерго исследовались режимы работы технологической установки, функционирующей по скоростной электротермовакуумной технологии. Рекомендуемые режимы пропитки и сушки изоляции ЭД при использовании данной установки приведены в таблицах 4.2 – 4.5.

Важнейшими из разработанных рекомендаций являются оптимальные сочетания технологий восстановления изоляции с конкретными условиями эксплуатации электродвигателей в различных отраслях сельского хозяйства (таблицы 4.6 – 4.8).

Таблица 4.2 – Рекомендуемые режимы сушки обмоток двигателей до пропитки скоростным вакуумным методом

Класс изоляции	Температура сушки, °С	Глубина вакуума, кПа	Время $t_в$, с	Количество циклов, шт.	Время сушки*, мин
B	60 – 70 65 – 75	100 – 150 100 – 110	0,1 – 1 0,1 – 0,5	1 (нагрев) 3 (сушка)	15 30
F	70 – 80	100 – 150 100 – 110	0,1 – 1 0,1 – 0,5	1 (нагрев) 3 (сушка)	12 25
H	80 – 90	100 – 150 100 – 110	0,1 – 1 0,1 – 0,5	1 (нагрев) 3 (сушка)	10 20

* За время сушки обмоток принято время стабилизации $\overline{Ш}_{П}$.

Таблица 4.3 – Рекомендуемые режимы пропитки обмоток электродвигателей скоростным вакуумным методом

Класс изоляции	Марка лака (компаунда)	Температура пропитки, °С	Вязкость, с	$p_{ост}$, кПа	Время $t_в$, с	Кол-во циклов
B	МЛ-92	75	20	120 – 150	0,5 – 1	1
		55	40	100 – 110	0,1 – 0,5	
	ГФ-95	75	20	110 – 130	0,5 – 1	2
		55	40	100 – 110	0,1 – 0,5	
F	ПЭ-933	85	30	120 – 140	0,1 – 0,5	1
		65	60	100 – 110	0,1 – 0,5	
		85	30	115 – 135	0,1 – 0,5	2
		65	60	100 – 110	0,1 – 0,5	
H	КО-916к	90	40	120 – 150	0,1 – 0,5	1
		100	90	100 – 110	0,1 – 0,5	
		90	40	110 – 130	0,1 – 0,5	2
		100	90	100 – 110	0,1 – 0,5	

Таблица 4.4 – Рекомендуемые режимы сушки изоляции обмоток электрических двигателей после пропитки скоростным вакуумным методом

Класс изоляции	Марка лака (компаунда)	Глубина вакуума $p_{ост}$, кПа	Температура сушки T_c, °С	Время создания вакуума $t_в$, с	Количество циклов n, шт.	Время сушки* t_c, мин
B	МЛ-92	120 – 140	90	0,5 – 1	5	50
	ГФ-95	125 – 150	100	0,5 – 1	5	80
F	ПЭ-933	120 – 140	100 – 110 (1 этап)	0,5 – 1	5	70
		100 – 110	120 – 130 (2 этап)	0,1 – 0,5	5	100
H	КО-916к	120 – 140	100 – 110 (1 этап)	0,1 – 0,5	4	70
		100 – 110	160 – 170 (2 этап)	0,1 – 0,5	4	90

* За время сушки изоляции статорных обмоток принимается полное время сушки и полимеризации.

Таблица 4.5 – Режимы, обеспечивающие максимальное качество электротермовакуумной пропитки и сушки при определенном уровне затрат

Затраты, руб.	Температура пропитки, °С	Количество циклов вакуумирования, шт.	Температура сушки, °С	Глубина вакуума, о.е.	Время создания вакуума, с	Время пропитки, мин	Время сушки, мин
250	30	3	80	0,50	0,5 – 1	10	12
300	40	1	100	0,40	0,5 – 1	11	10
350	40	1	100	0,50	0,5 – 1	11	10
400	50	3	80	0,50	0,5 – 1	13	13
450	60	1	100	0,40	0,5 – 1	13	10
500	70	2	100	0,40	0,5 – 1	14	11
550	70	1	100	0,50	0,1 – 0,5	14	11
600	40	3	100	0,40	0,1 – 0,5	15	12
650	70	1	100	0,60	0,1 – 0,5	15	13
700	80	2	100	0,50	0,1 – 0,5	17	12
750	90	2	100	0,50	0,1 – 0,5	18	12
800	110	2	100	0,50	0,1 – 0,5	18	12

Таблица 4.6 – Рекомендуемые технологии восстановления изоляции обмоток ЭД в растениеводстве

Наименование помещения	Технологические механизмы и оборудование	Рекомендуемые технологии ремонта
Цеха по переработке плодов и овощей	Линии товарной обработки плодов, агрегаты для сортировки плодов, транспортеры инспекционные, закаточные машины, машины для резки корнеплодов, насосы	Струйная пропитка
Овощехранилища, фруктохранилища	Линии обработки овощей, транспортеры	Струйная пропитка
Наименование помещения	Технологические механизмы и оборудование	Рекомендуемые технологии ремонта
Пункты послеуборочной обработки зерна и технических культур	Зерносушилки, зернопогрузчики, зерноочистительные машины, молотилки, зернодробилки	Скоростная электротермовакуумная технология

Продолжение таблицы 4.6

Моечные отделения цехов по переработке плодов и овощей	Машины для мойки плодов, машины для отмывки семян	Вакуумно-нагнетательная технология
Парники, теплицы	Опрыскиватели, парниковые транспортеры	Вакуумно-нагнетательная технология
Помещения для протравливания семян	Протравливатели семян	Скоростная электротермовакуумная технология

Таблица 4.7 – Рекомендуемые технологии восстановления изоляции электродвигателей в животноводстве

Наименование помещения	Технологические механизмы и оборудование	Рекомендуемые технологии ремонта
Инкубатории	Линии для обработки яиц, яйцемоечные машины, яйцесортировальные машины	Струйная пропитка
Цеха по переработке продуктов животноводства	Костедробильные машины	Вакуумно-нагнетательная пропитка
	Маслоизготовители, электропилы для распиловки туш, полуавтоматы для расфасовки меда, прессы	Струйная пропитка
Наименование помещения	Технологические механизмы и оборудование	Рекомендуемые технологии ремонта
Кормоприготовительные цеха для влажных кормов животноводческих ферм и комплексов	Кормоприемники-питатели, питатели-дозаторы, транспортеры, измельчители кормов, смесители кормов, кормоприготовительные агрегаты, фаршемешалки	Вакуумно-нагнетательная технология

Продолжение таблицы 4.7

Доильные залы, молочные отделения, насосные отделения, моечное отделение молочных ферм	Молочные насосы доильных установок, охладители, сепараторы, пастеризаторы, моечные установки, транспортеры, насосы	Скоростная электротермовакуумная технология
Животноводческие и птицеводческие помещения	Бункеры-дозаторы, кормораздатчики, навозные транспортеры, насосы, поильные установки, приточно-вытяжные установки, установки для создания микроклимата, оборудование для сушки помета	Скоростная электротермовакуумная технология

Таблица 4.8 – Рекомендуемые технологии восстановления изоляции в зависимости от условий эксплуатации во вспомогательном производстве

Наименование помещения	Технологические механизмы и оборудование	Рекомендуемые технологии ремонта
Мастерские	Металлорежущие и заточные станки, мешкозашивочные машины	Пропитка погружением, на стендах с нижней подачей лака, методом электрофореза
Наименование помещения	Технологические механизмы и оборудование	Рекомендуемые технологии ремонта
Силосные и сенажные башни, наружные установки (под навесом)	Загрузчики башен, электростригательные установки	Вакуумно-нагнетательная технология
	Дождевальные установки, водоподъемные насосы	Скоростная электротермовакуумная технология
Склады минеральных удобрений	Измельчители минеральных удобрений, транспортеры удобрений	Скоростная электротермовакуумная технология

По результатам перебора вариантов различных режимов работы установки скоростной электротермовакуумной пропитки и сушки электродвигателей и отсева по экономическим критериям можно сделать вывод о том, что одной из самых энергоемких составляющих ремонта является набор температуры, а создание вакуума, напротив, не так дорого в экономическом плане [1]. Таким образом, были выбраны самые экономичные режимы работы установки, которые обеспечивают минимум затрат при возможном максимальном качестве ремонта [170, 419, 420].

Для примера приведем расчет эффективности внедрения рекомендаций по пропитке и сушке изоляции ЭД для привода вальцов мельницы и вентилятора машинно-тракторной мастерской. Мельница эксплуатируется в фермерском хозяйстве «Полюс», а машинно-тракторная мастерская находится в сельскохозяйственной артели «Первое мая». Привод вальцов мельницы осуществляется с помощью двигателя 4А80А4У3 мощностью 1,1 кВт, а вентилятора – 4А90L4У3 мощностью 2,2 кВт.

Основными ремонтными предприятиями считаются ПРП Алтайэнерго, эксплуатирующее установку, реализующую скоростную электротермовакуумную технологию, ОАО «Алтайагропромремонт», использующее пропитку погружением, и ЗАО «Барнаульский патронный завод», применяющее капельную пропитку.

Удаленность хозяйства «Полюс» от указанных ремонтных предприятий 35, 26 и 34 км соответственно, а сельскохозяйственной артели «Первое мая» – 34, 30 и 27 км.

Транспортные расходы по перевозке электродвигателей к месту проведения капитального ремонта для фермерского хозяйства «Полюс» составят, соответственно, $З_{тр11}$ = 39,27 руб., $З_{тр12}$ = 29,2 руб., $З_{тр13}$ = 38,2 руб., сельскохозяйственной артели «Первое мая» – $З_{тр21}$ = 63,65 руб., $З_{тр22}$ = 56,16 руб., $З_{тр23}$ = 50,55 руб. в ценах 2000 г.

Определение ущерба проводилось при условии наличия ремонтного запаса двигателей и времени замены – 1 ч. Выход из строя двигателя привода вальцов мельницы нарушает технологический процесс размола зерна. Производительность мельницы 2 т/ч. За 1 ч простоя не будет выпущено 40 мешков муки. Ущерб от недовыпуска 1 мешка муки составляет 50 руб. Общий ущерб равен 2000 руб. При выходе из строя вентилятора машинно-тракторной мастерской нарушаются нормированные условия микроклимата помещения. В машинно-тракторной мастерской установлены два вентилятора и при нарушении работоспособности одного из них второй остается в работе. Поскольку ущерб здоровью рабочих за время замены двигателя вентилятора незначителен, технологические процессы, осуществляемые в мастерской, не прекращаются. Материальный ущерб в данном случае отсутствует.

Затраты на ремонт обмотки электродвигателя 4А90L4У3 на ОАО «Алтайагропромремонт» составляют $З_{р\Sigma 11}$ = 310 руб., на ЗАО «Барнаульский патронный завод» – $З_{р\Sigma 12}$ = 420 руб., а на ПРП Алтайэнерго – $З_{р\Sigma 13}$ = 651 руб. Затраты на ремонт обмотки двигателя 4А80А4У3 на указанных предприятиях

составляют, соответственно, $З_{р\Sigma 21}$ = 242 руб., $З_{р\Sigma 22}$ = 327 руб., $З_{р\Sigma 23}$ = 510 руб.

Качество изоляции после ремонта при использовании пропитки погружением и конвекционной сушки, в среднем, составляет $Ш_{рем} = 0{,}65$, струйной пропитки и конвекционной сушки – $Ш_{рем} = 0{,}75$, а электротермовакуумной технологии – $Ш_{рем} = 0{,}96$.

Срок службы изоляции электрического двигателя определялся на основе разработанных регрессионных моделей [15]. Если электродвигатель привода вальцов мельницы отремонтирован на ОАО «Алтайагропромремонт», то срок службы составит $t_{сл11}$ = 2538 ч, на ЗАО «Барнаульский патронный завод» – $t_{сл12}$ = 3946 ч, на ПРП Алтайэнерго – $t_{сл13}$ = 5623 ч. В случае ремонта двигателя привода вентилятора на указанных предприятиях, расчетный срок службы составит, соответственно, $t_{сл21}$ = 5664 ч, $t_{сл22}$ = 7104 ч, $t_{сл23}$ = 9909 ч. Тогда единый экономический критерий в каждом случае будет равен

$$З_{У11} = \frac{З_{рУ11} + З_{тр11} + У_{У1}}{t_{сл11}} + З_{ТО} = \frac{242 + 39{,}27 + 2000}{1{,}32} + 0 = 1728{,}23\,\text{руб.};$$

$$З_{\Sigma 12} = 1122 \text{ руб.};$$

$$З_{\Sigma 13} = 878{,}69 \text{ руб.};\ З_{\Sigma 21} = 126{,}66 \text{ руб.};\ З_{\Sigma 22} = 128{,}69 \text{ руб.};\ З_{\Sigma 23} = 135{,}95 \text{ руб.}$$

Анализ полученных значений единого экономического критерия показывает, что для двигателя привода вальцов мельницы наименьший ущерб, наносимый сельхозпроизводителю, будет при использовании скоростной электротермовакуумной технологии. При этом срок службы электродвигателя при использовании для ремонта изоляции скоростной электротермовакуумной технологии взамен технологии, основанной на сочетании конвекционной сушки и пропитки погружением, увеличивается в

$$\frac{t_{сл13}}{t_{сл11}} = \frac{2{,}9}{1{,}32} = 2{,}19 \text{ раза},$$

а возможный ущерб сокращается в

$$\frac{З_{\Sigma 11}}{З_{\Sigma 13}} = \frac{1728{,}23}{878{,}69} = 1{,}97 \text{ раза}.$$

В случае ремонта электродвигателя 4А90L4У3 затраты на ремонт соизмеримы, но их наименьшее значение соответствует технологии, основанной на пропитке погружением и конвекционной сушке, используемой на ОАО «Алтайагропромремонт».

4.4 Основные результаты и выводы по разделу

1 Реализованная для специализированных предприятий агропромышленного комплекса электротермовакуумная технология разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток электрических двигателей при небольших габаритах стационарной установки обеспечивает высокую производительность, качество изделий, сокращение времени протекания данного процесса, экономию трудовых и материальных ресурсов, возможность автоматизации процесса с включением его в единую схему ремонта.

2 Разработанный мобильный ремонтно-диагностический комплекс, включающий передвижную установку по разрушению связующего, пропитке и сушке изоляции скоростным вакуумным методом и мастерскую по диагностике, прогнозированию и ремонту электродвигателей, позволяет минимизировать время аварийного простоя оборудования и связанный с этим ущерб, а также решить проблему не только труднодоступности и удаленности сельскохозяйственных районов, но и низкой надежности эксплуатирующихся в сельском хозяйстве ЭД.

3 Предложенный обобщенный диагностический параметр Ψ дает возможность упростить задачу оценки качества изоляции электродвигателей в процессе обслуживания и ремонта за счет применения метода, позволяющего получать достоверную информацию о ее техническом состоянии. При этом в качестве технических критериев оптимизации наиболее удобно использование нормированных разностных обобщенных диагностических параметров, определяющих изменение ОДП на различных этапах процесса восстановления изоляции ЭД в относительной форме.

4 Существующие в настоящее время для описания процессов старения и восстановления изоляции модели, несмотря на их достоинства, не могут использоваться в качестве целевой функции при оптимизации параметров технологий пропитки и сушки обмоток ЭД, поскольку не во всех случаях описывают состояние изоляции в зависимости от необходимого перечня воздействующих факторов. Основным способом создания соответствующих моделей явилось проведение дополнительных экспериментальных исследований с последующей обработкой их результатов с помощью методов информационно-логического анализа.

5 Разработанная методика оптимизации процесса восстановления изоляции электродвигателей позволяет решать следующие основные задачи: выбор оптимальных параметров электротермовакуумной технологии пропитки и сушки изоляции; выбор оптимального состава методов пропитки и сушки на различных этапах технологического процесса; выбор оптимального сочетания условий эксплуатации двигателей в сельском хозяйстве с возможными технологиями восстановления их изоляции.

6 Предложенная методика оптимизации, учитывающая специфику работы электродвигателей на предприятиях АПК, дает возможность рассчитывать режимы, обеспечивающие максимально возможное качество изоляции при заданном уровне затрат на ремонт. Например, при уровне затрат 800 руб. на один двигатель, температура пропитки должна составлять 110 °С, температура сушки – 100 °С, время пропитки – 18 мин, время сушки – 12 мин (при этом величина нормированного разностного обобщенного диагностического параметра достигает значения, близкого к 1).

7 Использование разработанных рекомендаций по выбору режимов электротермовакуумной технологии пропитки и сушки изоляции ЭД повышает срок ее службы в 1,7 – 2,2 раза и сокращает ежегодный ущерб, наносимый сельскохозяйственному производителю, в 1,3 – 1,8 раза.

5 СИТУАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ ДИАГНОСТИКИ

Результаты статистических исследований показывают, что до начала реформ рентабельность производства зерна в стране не опускалась ниже 200 % [445]. Например, в 1989 г. она составила 260 %, в 1990 г. – 200 %, в 1991 г. – 217 %. Сегодня это производство в большинстве хозяйств низкорентабельно или вовсе убыточно. Причиной столь резкого падения является диспаритет цен на сельхозпродукцию по сравнению с ценами на топливо, технику и удобрения. Аналогичные выводы можно сделать и относительно большинства отраслей сельского хозяйства. Данное обстоятельство практически лишило хозяйства собственных инвестиционных средств [446 – 448].

В ходе реформы государство значительно сократило финансовую поддержку сельского хозяйства. В 1990 г. государственные ассигнования составляли 71 % инвестиций в производственные объекты сельского хозяйства РСФСР, остальные капиталовложения делали колхозы [449]. В 1999 г. доля бюджетных средств в капиталовложениях, и так уже многократно уменьшившихся, составила всего 6,6 %. С 1994 по 2000 гг. доля средств для инвестиций в агропромышленную сферу из федерального бюджета сократилась с 12 до 4 %, из бюджетов субъектов федерации и местных бюджетов – с 16 до 4 %. При этом доля собственно сельского хозяйства в общих инвестициях в агропромышленный комплекс сильно снизилась [2].

В силу сказанного, произошло нарушение цикла обновления всех производственных мощностей агропромышленного производства, в т. ч. и электроэнергетической базы хозяйств. В 1999 г. выбытие энергетических мощностей в 2,6 раза превышало их поступление в сельское хозяйство. В 2000 г. степень износа электроэнергетического фонда сельского хозяйства РФ составила 67,9 %, в 2005 г. – 73,4 %.

Реализуемая в настоящее время государственная политика поддержки АПК, по своей сути, однобока, т. к. не предполагает выделения финансовых средств на поддержание в работоспособном состоянии вновь вводимого электроэнергетического оборудования, а также качественный ремонт последнего.

Возможным выходом из сложившейся ситуации могло бы стать снижение себестоимости сельхозпродукции путем оптимального контроля всех статей производственных затрат. Однако до последнего времени вопросам ресурсосбережения внимания практически не уделялось, вследствие чего сельхозпредприятия на сегодняшний день не имеют опыта и технологий снижения производственных затрат [257].

Известно, что одной из существенных статей расходов для любого сельскохозяйственного предприятия являются затраты на техническое обслуживание и ремонт электрооборудования, которые составляют 10 – 20 % от общих затрат на эксплуатацию всего производственного оборудования сельхозпредприятий [450]. При этом эффективное проведение ремонтных мероприятий в современных условиях возможно только при наличии такой мето-

дики планирования работ, которая опиралась бы на данные о текущем финансовом положении хозяйств, техническое состояние каждой единицы электрооборудования и современные методы математического моделирования, позволяющие выявить и максимально полно описать взаимосвязь между всеми вышеуказанными параметрами [451, 452].

Посвященные моделированию процессов эксплуатации различных технических элементов исследования были предприняты еще в прошлом веке математиками А. К. Эрлангом, А. Т. Пуассоном, которые ввели понятие теории массового обслуживания. Позднее, уже в нашей стране, данная теория активно развивалась такими учеными, как А. А. Марков, А. Я. Хинчин и др. [104, 453 – 455]. Полученные ими результаты заложили основу современной теории массового обслуживания.

В настоящее время системы массового обслуживания (СМО) занимают центральное место в следующих задачах планирования и управления эксплуатационными параметрами, определяющими показатели надежности электрооборудования [456]:

- планирование сроков, объемов и качества ремонта электрооборудования;
- прогнозирование длительностей простоя технологических процессов и связанных с ними убытков;
- оценка полноты использования установленных электрических мощностей.

При этом основной задачей СМО является определение оптимальных показателей надежности и способов их достижения путем управления данными параметрами.

Таким образом, современная экономическая ситуация в АПК вынуждает сельхозпредприятия «на ходу» менять графики ремонтов, отталкиваясь от актуального объема денежных средств, что возможно эффективно реализовать с помощью такой системы массового обслуживания, которая позволит учесть влияние вышеуказанных факторов и достичь существенного экономического эффекта [178, 456].

5.1 Анализ методов планирования работ по ремонту электрических двигателей на предприятиях АПК

Как показали результаты исследований, выполненных в России и за рубежом, существует достаточно большое количество теоретических подходов к управлению системами массового обслуживания от использования простейших эмпирических формул до применения математического аппарата теории случайных функций и разработки дорогостоящих программных продуктов, осуществляющих различные виды планирования [457 – 463].

Вслед за развитием математической теории массового обслуживания, постоянно совершенствовались и методы планирования сроков и объемов ремонта электрооборудования. Так, в СССР исследования, посвященные управлению СМО, благодаря работам И. Н. Коваленко, А. Я. Хинчина, Б.

В. Гнеденко и их коллег [105, 464, 465], активно проводились в 50 – 60-е гг. прошлого века.

Правила прохождения вышедшего из строя ЭО по всем элементам системы ремонта в зависимости от его текущего состояния, лежащие в основе методов планирования ремонтных работ, в теории массового обслуживания принято называть управляемыми дисциплинами обслуживания (УДО). Другими словами, все методы планирования сроков и объемов ремонта различаются входящими в их состав УДО.

Существующие УДО можно декомпозировать на две большие группы [465]: аналитические управляемые дисциплины обслуживания (УДОА), к которым относятся дисциплины, представляющие собой некоторые аналитические выражения (приоритетные функции), вычисляемые в процессе изменения состояния системы, и табличные (УДОТ), представленные в виде массивов управлений, в которых каждому состоянию системы ставится в соответствие оптимальное (для данного состояния) управление, определяющее текущее местоположение вышедшего из строя оборудования и режимы его ремонта. Данные массивы синтезируются численным путем и используются для оперативного управления процессом обслуживания заявок в системе.

Рассмотрим более подробно правила обслуживания электрооборудования с линейным характером потерь от пребывания в системе его ремонта. В частности, дисциплина обслуживания Шраге (в зарубежных источниках – дисциплина SRPT (the shortest remaining processing time discipline)) формулируется следующим образом: высший приоритет в обслуживании предоставляется заявке с минимальным временем дообслуживания [457]. При этом в работе [466] однолинейная управляемая система массового обслуживания (УСМО) с неограниченным числом мест для ожидания вышедших из строя технических элементов и произвольными входящими потоками ремонтных заявок рассматривается при следующих допущениях: момент поступления заявок не зависят от дисциплины обслуживания; длительность обслуживания определяется в момент прихода заявок; потери, связанные с прерываниями обслуживания, отсутствуют; отказы в обслуживании запрещены.

В [458] доказывается, что дисциплина Шраге является оптимальной с точки зрения минимизации времени пребывания или ожидания заявки, а также среднего числа заявок в системе ремонта или очереди. При более общих допущениях аналогичный вывод сделан в [459], когда ресурсы прибора обслуживания могут распределяться некоторым образом между несколькими одновременно обслуживаемыми заявками. Более детально дисциплина обслуживания Шраге изучалась в [460 – 463] в предположении, что входящие потоки заявок – простейшие и выполняется условие стационарности процесса обслуживания (коэффициент загрузки прибора $\rho = \lambda \int_0^\infty x dB(x) < 1$, где x – интенсивность входящего потока; $B(x)$ – функция распределения времени обслуживания). В [66, 467] получены преобразования Лапласа – Стильтьеса функций распределения времен ожидания и пребывания заявок в системе, а также формулы для вычисле-

ния первых двух моментов этих величин. Так, среднее время пребывания заявки в системе определяется согласно следующему выражению

$$V = \int_0^\infty \frac{\int_0^x y(1 - B(y))dy}{x^2(1 - \lambda \int_0^x y dB(y))} dx. \qquad (5.1)$$

В [468] обозначены границы, в которых может изменяться среднее время пребывания заявки в системе ремонта при фиксированной средней длительности обслуживания. Показано, что при дисциплине обслуживания Шраге максимальное среднее время пребывания получается при постоянном времени обслуживания. В [469] найдена формула для расчета среднего числа заявок в очереди при использовании дисциплины Шраге и при отсутствии допущения о непрерывности функции $B(x)$ [2].

Значительным ограничением для практического использования дисциплины Шраге является допущение о наличии полной и достоверной информации о длительностях обслуживания или дообслуживания всех устройств, находящихся в системе ремонта, что далеко не всегда бывает в условиях реального сельскохозяйственного производства. Поэтому представляет интерес рассмотрение общего случая, когда известны лишь распределения длительностей обслуживания заявок в ремонтной системе. В [470, 471] изучалась СМО типа M / G / ∞ со следующей дисциплиной обслуживания: каждой поступившей заявке соответствует некоторый приоритет $\xi \geq 0$, являющийся случайной величиной и распределенный по закону $F(x) = P(\xi < x)$.

В данном случае, продолжительность обслуживания заявки приоритета x распределена по закону $G_x(y)$: первой обслуживается заявка минимального приоритета, причем прерывания обслуживания не допускаются. В [443] найдены стационарное распределение времени ожидания начала обслуживания заявки приоритета x и распределение числа заявок в момент t в рассматриваемой системе. Показано, что в случае непрерывных приоритетов, минимальное значение стационарной средней очереди получается, если приоритеты расположены в порядке возрастания средних длительностей обслуживания. В [472] обозначены границы изменения стационарного времени ожидания начала обслуживания при фиксированных первых двух моментах длительности обслуживания и распределения, на которых эти границы достигаются.

Описанные аналитические управляемые дисциплины обслуживания минимизируют потери (среднюю длину очереди, среднее время пребывания или ожидания) в УСМО с однотипными заявками. Однако многим реальным системам свойственно обслуживание заявок нескольких типов, характеризующихся различными значениями убытков от ожидания. Вопросам анализа и синтеза УДОА в таких системах с простейшими входящими потоками заявок с одной

линией обслуживания и неограниченным числом мест для ожидания посвящены работы [449, 473 – 477].

Задача синтеза УДОА, минимизирующей в классе динамических приоритетов следующий критерий качества, решена в [478]

$$L = \lim_{T \to \infty} M \frac{1}{T} \sum_{\varphi} a_{i_\varphi} t_\varphi = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i a_i \nu_i, \tag{5.2}$$

где M – математическое ожидание; T – длительность наблюдения; t_φ – время пребывания заявки в системе; λ_i – интенсивность входящего потока заявок i-го типа; ν_i – среднее время пребывания в системе заявки данного типа; a_{i_φ} – убытки от пребывания в системе в течение единицы времени заявки t_φ-го типа, поступившей φ-й по порядку; N – число типов заявок.

Там же показано, что при отсутствии прерываний в обслуживании оптимальная УДОА совпадает с постоянными относительными приоритетами. Причем высший приоритет должен предоставляться заявке с максимальным отношением a_i / b_i, где b_i – среднее время обслуживания заявки i-го типа. При этом ограничения на вид распределений длительностей обслуживания заявок не накладываются.

Аналогичная система рассматривалась в [457, 479, 480], однако времена обслуживания заявок имели показательные распределения, при этом снимался запрет на прерывания обслуживания. Показано, что оптимальными в классе динамических приоритетов являются постоянные абсолютные приоритеты с предоставлением высшего приоритета заявке с максимальным значением $a_i u_i$, где u_i– интенсивность обслуживания заявки i-го типа. Таким образом, как в данном, так и предыдущем случаях наличие информации о числе заявок в системе не приводило к улучшению качества ее функционирования.

Одноканальная УСМО с неограниченной очередью, на вход которой поступают N простейших потоков заявок с интенсивностями λ_i, штрафами a_i и детерминированными длительностями обслуживания τ_i, изучалась в [481]. При этом ставилась задача синтезировать УДОА, минимизирующую (5.2). Показано, что правило выбора на обслуживание заявки с максимальным $a_i / Д\tau_i$, где $Д\tau_i$ – время дообслуживания заявки i-го типа, является оптимальным в достаточно широком классе дисциплин, включающих абсолютные и относительные приоритеты. Отметим, что при $a_i = a \forall i$ описанная УДОА совпадает с дисциплиной обслуживания Шраге.

Таким образом, особенностью аналитических управляемых дисциплин обслуживания является ограниченность областей их возможного применения. Так, все описанные выше УДОА могут использоваться лишь на одноканальных УСМО. Причем для дисциплины Шраге делается предположение об однородности всех заявок (одинаковых убытков от ожидания) и отсутствии отказов в их обслуживании, для дисциплины Климова – о простейших входящих потоках заявок, а также об отсутствии отказов. Все эти ограничения сужают области возможного применения УДОА, что, наряду с отсутствием универсальных ме-

тодов их синтеза, является существенным недостатком, не позволяющим широко использовать их в системах различного назначения.

В свою очередь, табличные управляемые дисциплины обслуживания лишены недостатков, свойственных УДОА. Во многих практически важных случаях имеются все необходимые предпосылки для разработки универсальных инженерных методик синтеза УДОТ, основанных на численных методах математического программирования, которые ориентированы на широкие классы УСМО. Однако здесь присутствуют сложности, заключающиеся, прежде всего, в трудоемкости синтеза УДОТ для систем с большим числом состояний. Более того, для полумарковских и немарковских моделей УСМО, адекватно описывающих многие реальные процессы массового обслуживания заявок, поиск оптимальной УДОТ (в широком смысле слова) теоретически возможен лишь при неограниченном числе фазовых состояний системы. Поэтому с целью практического решения задачи синтеза УДОТ ее ставят следующим образом: необходимо синтезировать такую управляемую дисциплину, которая минимизировала бы потери в системе при заданных ограничениях на число ее состояний N. Здесь величина N выступает в качестве управляющего параметра процесса синтеза, причем разработчик, задаваясь ограничениями на процесс функционирования системы, должен иметь возможность управлять числом ее состояний, а, следовательно, и трудоемкостью синтеза УДОТ.

Проведенный анализ показал, что синтез оптимальной УДОТ возможен лишь в исключительных случаях (например, для марковских УСМО 1-го класса). Это связано с тем, что для полного описания фазового состояния системы необходимо указывать времена текущего обслуживания частично обслуженных заявок, интервалы времени с моментов поступления последних заявок до момента наблюдения и, в ряде случаев, времена текущего пребывания заявок в системе [482]. Это приводит к появлению непрерывных компонентов в векторе текущего состояния УСМО, следствием чего является бесконечное число фазовых состояний системы. Поэтому обычно решают задачу синтеза не оптимальной, а квазиоптимальной УДОТ, наложив ряд ограничений на процесс функционирования УСМО и параметры управления и, тем самым, ограничив число состояний системы [2].

Более того, анализ методов исследования полумарковских и немарковских моделей УСМО 1-го и 2-го классов, основанных на сведении их к марковским моделям с помощью методов дополнительных переменных [69, 483] и гиперэрланговской аппроксимации [484, 485], показал их несостоятельность. Такой подход приводит к резкому расширению пространства состояний, нахождению приближенных решений, которые, в ряде случаев, далеки от оптимальных, и к невозможности управления трудоемкостью процессов синтеза путем изменения числа состояний УСМО, что делает применение данных систем не универсальным.

5.2 Исследование системы организации ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве как системы их массового обслуживания

Ранее было показано, что после проведения комплекса мероприятий по диагностике возникает возможность определения интенсивностей выходов из строя электродвигателей не на основе статистики отказов, которая может оказаться неточной, отсутствующей или сильно отличающейся от будущей статистики расчетного периода, а на основе объективного прогноза их остаточного ресурса. Построенные планы ремонтных мероприятий при данном подходе в большей степени точны и адекватны, т. е. необходимость использования современных методов диагностики и прогнозирования технического состояния электродвигателей для определения требуемых показателей систем массового обслуживания очевидна. Кроме того, данное определение показателей СМО предполагает исследование и обоснование входных параметров модели надежности ЭД; выбор закона распределения времени нахождения единичного двигателя в различных состояниях, а также закона распределения и длительностей ожидания ремонта; определение математического ожидания и дисперсии числа электродвигателей при известных интенсивностях их выхода из строя и восстановления.

Таким образом, приступая к исследованию системы организации ремонта электродвигателей, определим, прежде всего, входные параметры создаваемой модели надежности ЭД. При этом целью разработки данной математической модели является оптимальное управление этими параметрами, обеспечивающее глобальный минимум функционала потерь, который синтезируется как на процесс функционирования УСМО, так и на объем информации о ее текущем состоянии и поведении в прошлом [179].

В проделанной работе в качестве входных параметров модели, влияющих на исследуемый объект, при анализе процессов выхода из строя и восстановления электрооборудования в сельском хозяйстве были рассмотрены [2, 486]: количество электрических двигателей, используемых хозяйством; количество линий обслуживания (число ремонтных бригад с соответствующим оборудованием, работающих как в данном хозяйстве, так и являющихся сторонней организацией); интенсивность потока отказов (количество отказов в единицу времени, определяемое на основе результатов диагностики); интенсивность ремонта электродвигателей (количество двигателей, отремонтированных в единицу времени); стоимость ремонта каждого электродвигателя; убытки от простоя производственных мощностей в результате выхода электродвигателей из строя; прибыль, приносимая каждым двигателем.

Как показал анализ, синтез оптимального управления для применяемой на сельхозпредприятии системы массового обслуживания практически невозможен. Объясняется это тем, что для полного описания фазового состояния УСМО необходимо указывать время текущего обслуживания частично отремонтированных электродвигателей, интервалы времени с моментов последних отказов из рекуррентных потоков до момента наблюдения и время текущего

пребывания заявок в системе [106]. Это, в свою очередь, приводит к появлению непрерывных компонентов в векторе текущего состояния УСМО, следствием чего является бесконечное число состояний системы. Поэтому для данного случая удобнее решать задачу синтеза не оптимальной, а квазиоптимальной системы управления с наложением некоторых ограничений на процесс функционирования УСМО, ограничив тем самым число состояний системы.

Кроме того, специфика УСМО в АПК самостоятельно накладывает ряд ограничений: потоки выходов из строя и восстановления для данной системы можно считать пуассоновскими; при начале отсчета анализируемого периода можно пренебречь прошедшим временем обслуживания ранее вышедших из строя электродвигателей; количество двигателей и линий обслуживания не может быть бесконечным [60].

Таким образом, для себя сельскохозяйственное предприятие выбирает один из следующих способов организации ремонта электрооборудования:
1) ремонт электрических двигателей сторонними организациями;
2) создание собственной ремонтной базы.

В первом случае имеет место система с неограниченным потоком требований, принципиальная схема которой представлена на рисунке 5.1 [179, 487]. Отличительными особенностями ее функционирования является то, что ремонтная база состоит из ограниченного числа n ремонтных линий; каждая линия способна обслуживать одновременно только один двигатель (вышедший из строя ЭД, застав все обслуживающие линии занятыми, становится в очередь и находится в ней, пока одна из линий не освободится). В случае, когда вышедший из строя электродвигатель застает хотя бы одну свободную линию ремонта, он подлежит немедленному обслуживанию.

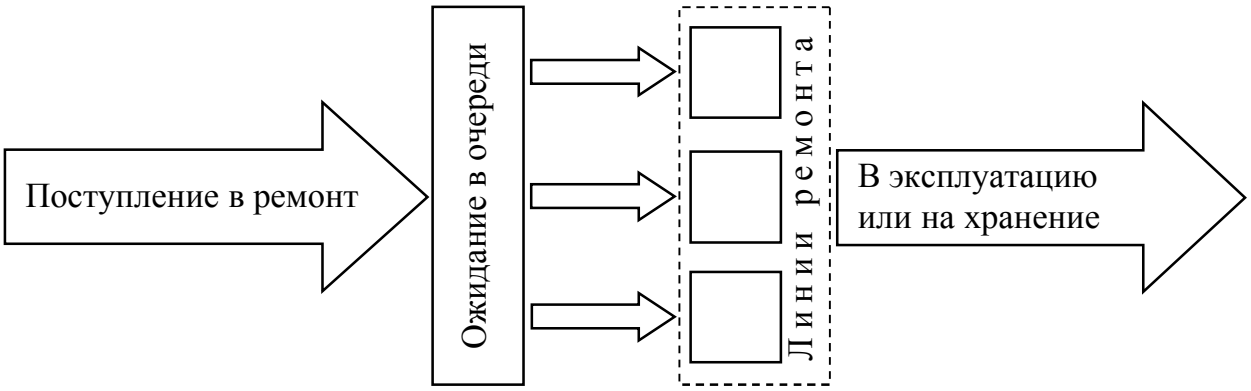


Рисунок 5.1 – Схема системы ремонта ЭД с неограниченным потоком требований

Данная система считается работоспособной при условии поступления в нее пуассоновского потока ремонтных заявок. Поток требований неограничен по своим возможностям, однако его плотность λ имеет конечное значение. Для каждого электродвигателя время ремонта $t_{обс}$ является случайной величиной, которая подчиняется показательному закону распределения с параметром μ.

Все линии ремонта обладают одинаковой производительностью. За основные показатели работы системы (выходные параметры разрабатываемой модели) приняты: вероятность того, что все линии обслуживания свободны или заняты, математическое ожидание длины очереди, коэффициенты занятости или простоя линий обслуживания.

При втором способе организации ремонта, когда система обслуживания является замкнутой (рисунок 5.2), отремонтированные электродвигатели возвращаются в источник требований и пополняют его [2]. При этом основные расчетные показатели данной системы аналогичны предыдущему случаю. Кроме того заметим, что при определении рассматриваемых показателей работы системы необходимо помнить, что ряд двигателей в сельском хозяйстве может иметь приоритет в обслуживании, а также возможна взаимопомощь между ремонтными бригадами.

Далее, определим следующие показатели эксплуатации электрических двигателей: закон распределения времени нахождения единичного двигателя в различных состояниях; математическое ожидание и дисперсия числа электродвигателей при известных интенсивностях их выхода из строя и восстановления. При этом процесс эксплуатации ЭД на сельхозпредприятии рассмотрим как марковский процесс «гибели и размножения» с непрерывным временем [488].

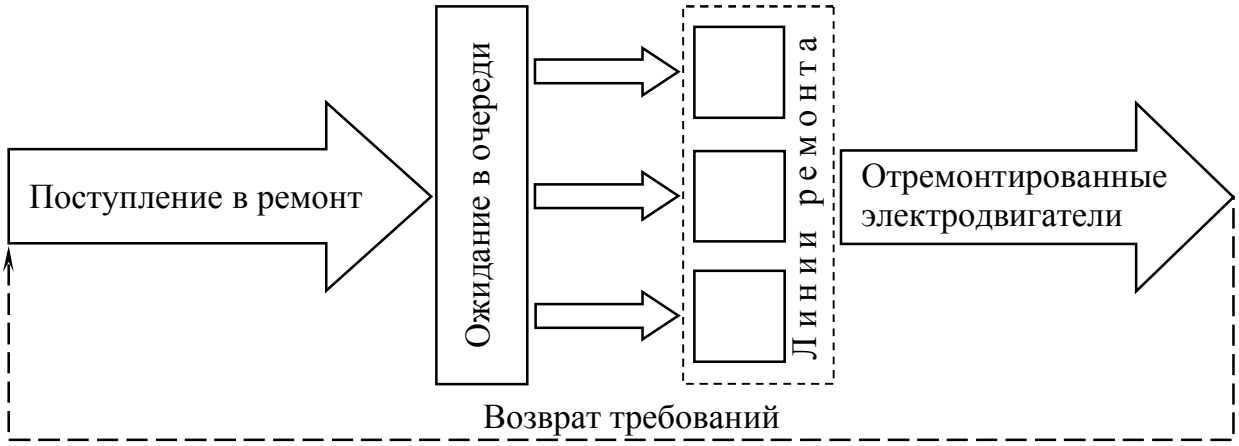


Рисунок 5.2 – Схема замкнутой системы массового обслуживания двигателей

Предположим имеется электрический двигатель, который может находиться в одном из двух состояний: S_1 – двигатель исправен (работает); S_2 – двигатель неисправен (находится в ремонте или ожидает замены на аналогичный). При этом на ЭД, находящийся в состоянии S_1, действует поток отказов с интенсивностью $\lambda(t)$, переводящий его в состояние S_2, а на двигатель в состоянии S_2 действует поток восстановлений с интенсивностью $\mu(t)$. Оба потока пуассоновские, независимые [178].

Для данной системы уравнения Колмогорова имеют вид:

$$dp_1(t)/dt = p_2(t)\mu(t) - p_1(t)\lambda(t);$$
$$dp_2(t)/dt = p_1(t)\lambda(t) - p_2(t)\mu(t), \qquad (5.3)$$

где $p_1(t)$ и $p_2(t)$ – вероятности нахождения двигателя в состояниях S_1 и S_2 соответственно ($p_1(0)=1$, т. к. двигатель исправен в начальный момент времени).

Путем преобразования выражений (5.3) можно получить одно дифференциальное уравнение с одной неизвестной функцией $p_1(t)$

$$dp_1(t)/dt + [\mu(t) + \lambda(t)]p_1(t) = \mu(t). \qquad (5.4)$$

Решением линейного дифференциального уравнения (5.4) с переменными коэффициентами при начальном условии $p_1(0)=1$ является зависимость

$$p_1(t) = e^{-\int_0^t [(\lambda(\tau)+\mu(\tau)]dt} \left[\int_0^t \mu(t) e^{\int_0^t [(\lambda(x)+\mu(x)]dx} d\tau + 1 \right]. \qquad (5.5)$$

При произвольных зависимостях $\mu(t)$ и $\lambda(t)$ вычисление $p_1(t)$ достаточно трудоемко. Численный метод решения уравнения (5.4) на ЭВМ оказывается более простым [489, 490]. Если принять допущение, что финансовое положение хозяйства стабильно и средства на ремонт распределены в течение года равномерно, а качество ремонта не зависит от времени, то можно рассмотреть частный случай, когда интенсивности $\mu(t)$ и $\lambda(t)$ не зависят от времени

$$м(t) = м = \text{const}, л(t) = л = \text{const}. \qquad (5.6)$$

В данном случае необходимости решать уравнение (5.5) нет. Достаточно решить линейное дифференциальное уравнение, в которое превратится (5.4) при $\mu(t) = \mu, \lambda(t) = \lambda$ и начальном условии $p_1(0)=1$

$$dp_1(t)/dt + (\lambda + \mu)p_1(t) = \mu. \qquad (5.7)$$

Тогда

$$p_1(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t};$$
$$p_2(t) = 1 - p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu}(1 - e^{-(\lambda+\mu)t}). \qquad (5.8)$$

При $t \to \infty$ вероятности p_1 и p_2 определяются из выражений:

$$p_1 = \lim_{t \to \infty} p_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu};$$
$$p_2 = \lim_{t \to \infty} p_2(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \qquad (5.9)$$

т. е. в системе устанавливается стационарный режим, при котором электродвигатель будет менять свое состояние, переходя из S_1 в S_2 и обратно. Вероятности этих состояний уже не зависят от времени [491]. Их можно объяснить как некоторое среднее относительное время пребывания электрического двигателя в состояниях S_1 и S_2.

Имея распределение (5.9), величину прибыли и убытков за каждый день работы или простоя электродвигателя, которые определяются согласно методике [492], можно найти объем прибыли, приносимой каждым ЭД за некоторый период

$$P = Ap_1 - Bp_2 = A\frac{\mu}{\lambda + \mu} - B\frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \qquad (5.10)$$

где P – общая прибыль; A – прибыль, приносимая исправным двигателем; B – убытки от каждого неисправного электродвигателя.

Интенсивность потока восстановления электродвигателей напрямую зависит от объема выделенных на ремонт средств, и, соответственно, в течение финансового периода меняться не будет. Интенсивность потока отказов может зависеть от времени только в том случае, если внешние условия работы ЭД меняются [492]. Как правило, они постоянны на протяжении всего срока службы оборудования, т. е. в реальных условиях можно принять $м = \text{const}, л = \text{const}$. Выражение (5.10) является адекватным и может быть использовано при практических расчетах [491].

Важными показателями системы организации ремонта ЭО являются математические ожидания и дисперсии числа электродвигателей. При этом будем считать, что интенсивности их выхода из строя и восстановления известны. Другими словами, установим, что интенсивность капитального ремонта или поступления на сельхозпредприятия новых машин равна $\lambda(t)$. Вновь поступивший ЭД имеет время эксплуатации $t_{сл}$, по прошествии которого списывается или отправляется на капитальный ремонт. Время $t_{сл}$ распределено по показательному закону с параметром μ. Рассмотрим случайный процесс $X(t)$ – число электрических двигателей определенного типа, находящихся в эксплуатации на момент времени t. Найдем одномерный закон распределения случайного процесса $X(t)$ при максимальном числе ЭД, равном n.

Согласно [178, 179, 481], в рассматриваемом случае имеет место процесс гибели и размножения с ограниченным числом состояний, размеченный граф которого представлен на рисунке 5.3.

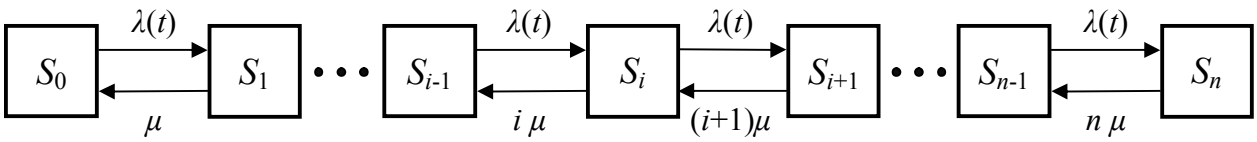


Рисунок 5.3 – Размеченный граф процесса гибели и размножения $X(t)$

Для размеченного графа, изображенного на рисунке 5.3, система уравнений Колмогорова имеет вид:

$$
\begin{aligned}
& dp_0(t)/dt = \mu p_1 - \lambda(t)p_0(t); \\
& \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
& dp_i(t)/dt = \lambda(t)p_{i-1}(t) + (i+1)\mu p_{i+1}(t) - (\lambda(t) + i\mu)p_i(t) \ (i = 1, 2, \ldots, n-1); \\
& \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
& dp_n(t)/dt = \lambda(t)p_{n-1}(t) - n\mu p_n(t).
\end{aligned}
\tag{5.11}
$$

Решается данная система уравнений при начальных условиях: $p_k(0) = 1$, $p_i(0) = 0$ ($i = 1, 2, \ldots, i \neq k$), где k – начальное количество электродвигателей в конкретном хозяйстве, а $\sum_{i=1}^{n} p_i(0) = 1$ – нормировочное условие.

При произвольной функции $\lambda(t)$ отыскание решения системы (5.11) в общем виде представляет трудности и не имеет практической ценности. Наибольший интерес для настоящей задачи представляет знание характеристик процесса $X(t)$: $M[X(t)]$ и $D[X(t)]$, тогда как одномерный закон распределения является лишь промежуточным звеном в подобном исследовании [481].

Приняв интенсивности потоков выходов из строя и восстановления постоянными, можно непосредственно вычислить характеристики изучаемого процесса. При данных допущениях и конечном числе состояний n+1 имеет место стационарный режим. Следует это из того, что множество W всех состояний процесса выхода из строя и восстановления ЭД является эргодическим [493]. Таким образом, систему S с числом состояний n+1, в которой протекает процесс гибели и размножения, можно рассматривать как простейшую эргодическую систему.

Для эргодического процесса выхода из строя и восстановления, находящегося в стационарном режиме, предельные вероятности состояний могут быть получены путем преобразования системы (5.11), в которой все интенсивности потоков взяты постоянными, а все производные вероятностей состояний приняты равными нулю

$$\mu_i p_i = \lambda_{i-1} p_{i-1} \ (i = 1, 2, \ldots, n-1). \tag{5.12}$$

Сформулировав в виде правила смысл зависимости (5.12): для простейшей схемы выхода из строя и ремонта электродвигателей, находящейся в

стационарном режиме, значения переходных вероятностей между двумя соседними состояниями равны, можно записать

$$p_i = \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} p_{i-1} = \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} \frac{\lambda_{i-2}}{\mu_{i-1}} \ldots \frac{\lambda_0}{\mu_1} p_0 = p_0 \prod_{k=1}^{i} \frac{\lambda_{k-1}}{\mu_k} \; (i = 1, 2, \ldots, n), \tag{5.13}$$

т. е. любую предельную вероятность можно выразить через предельную вероятность p_0, которую можно найти из нормировочного условия

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \prod_{k=1}^{i} \lambda_{k-1} / \mu_k}. \tag{5.14}$$

Выражения (5.12) и (5.14) позволяют вычислить предельные вероятности состояний простейшего процесса выхода из строя и ремонта двигателей, находящегося в стационарном режиме в условиях сельскохозяйственного производства.

Принимая, что в хозяйстве не может находиться более n электродвигателей определенного типа, для p_0 справедливо записать

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \prod_{k=1}^{i} \lambda_{k-1} / \mu_k} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} a^i / i!} = \frac{e^{-a}}{\sum_{i=0}^{n} a^i e^{-a} / i!} = p(0,a) / R(n,a), \tag{5.15}$$

где $R(n,a) = \sum_{k=0}^{n} P(k,a) = \sum_{k=0}^{n} a^k e^{-a} / k! (k = 0,1,\ldots)$; $P(k,a)$ – распределение Пуассона.

С учетом сказанного и (5.13)

$$p_i = p_0 \prod_{k=1}^{i} \lambda / \mu_k = p_0 \prod_{k=1}^{i} \lambda / (k\mu) = p_0 \frac{a^i}{i!} = \frac{a^i e^{-a}}{i!} \cdot \frac{1}{R(n,a)} = \\ = P(i/a) / R(n,a) \; (i = 0,1,\ldots,n). \tag{5.16}$$

Распределение вида (5.16) является усеченным законом Пуассона и зависит от двух параметров: α и n [494]. Поэтому, число электродвигателей, находящихся в эксплуатации в стационарном режиме, при условии, что их общее число не может быть больше n, распределено по усеченному закону Пуассона с параметрами α и n, где параметр α равен отношению интенсивности потока ремонта двигателей в хозяйстве λ к интенсивности потока выхода из строя каждого ЭД μ.

Таким образом, математическое ожидание числа эксплуатируемых электродвигателей в стационарном режиме может быть найдено из выражения [178]

$$M[X(t)] = \sum_{i=0}^{n} ip_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} iP(i,a)}{R(n,a)} = \frac{1}{R(n,a)} \sum_{i=1}^{n} \frac{a^i}{(i-1)!} e^{-1} = \frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}. \qquad (5.17)$$

В свою очередь, дисперсия количества ЭД вычисляется по формуле

$$D[X(t)] = M[X^2(t)] - (M[X(t)])^2 = \frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)} + \\ + a^2 \left[\frac{R(n-2,a)}{R(n,a)} - \left(\frac{R(n-1,a)}{R(n,a)} \right)^2 \right] (n > 1). \qquad (5.18)$$

При $n \to \infty$ $M[X(t)] = D[X(t)] = a$, т. к. $\lim_{k \to \infty}(R,a) = 1$.

Полученные зависимости (5.17) и (5.18) позволяют вычислять среднее количество и дисперсию числа исправных электрических двигателей в хозяйстве при известных постоянных интенсивностях выхода их из строя и восстановления [179, 487].

Далее, для построения оптимальных планов ремонтных мероприятий необходимо отыскать закон распределения и длительности ожидания ремонтов вышедших из строя ЭД. В соответствии с [495] каждый вышедший из строя электродвигатель будем называть запросом на обслуживание, а рабочую единицу ремонтного предприятия, способную за некоторый промежуток времени отремонтировать двигатель – восстанавливающим элементом или линией обслуживания. Тогда зная количество восстанавливающих элементов, интенсивность выхода электродвигателей из строя, а также время ожидания двигателями ремонта можно описать случайный процесс восстановления $\lambda(t)$.

Рассмотрим полнодоступный пучок линий обслуживания с ожиданием. Запросу на обслуживание, поступившему в некоторый момент времени, приходится ждать обработки только тогда, когда он застает все n линий занятыми. В этом случае на первый план выходит такая величина, как вероятность ожидания, играющая значительную роль в оценке качества работы пучка, но для систем с ожиданием эта роль сравнительно невелика, т. к., если даже значительному числу двигателей приходится ожидать, обслуживание должно быть признано удовлетворительным во всех тех случаях, когда длительности ожидания оказываются в большинстве своем очень малыми. Главную роль играет не частота ожидания ремонта, а природа времени ожидания γ как случайной величины. Отсюда конечная цель исследования полнодоступного

пучка линий с ожиданием – отыскание закона распределения времени ожидания ремонта электродвигателем γ.

Допустим, что ЭД обслуживаются в порядке их поступления, а длительности обслуживания конкретных двигателей независимы друг от друга и от течения потоков вызовов. За длительность обслуживания примем величину ℓ, которая подчиняется показательному закону ($P\{\ell > t\} = e^{-\beta t}$, $t > 0$, $\beta > 0$ – постоянная), и условимся обозначать через $0(\tau)$ всякую бесконечно малую порядка выше τ, где τ – промежуток времени бесконечно малой длины. Вероятность выхода из строя хотя бы одного электродвигателя за промежуток времени τ есть величина $\approx \lambda\tau$, а вероятность $\psi(\tau)$ выхода из строя двух и более двигателей – величина вида $0(\tau)$. Если какая-либо линия в данный момент занята, то вероятность оставаться занятой еще в течение τ секунд (или более) для нее равна $e^{-\tau}$. Если занято k линий, то вероятность того, что все они останутся занятыми в течение промежутка времени τ равна $e^{-k\tau}$. Вероятность же того, что в течение промежутка времени τ по меньшей мере одна из этих линий освободится, определяется как

$$1 - e^{-k\tau} \approx k\tau. \tag{5.19}$$

Количество занятых линий $N(t)$ при поступлении запросов на обслуживание и освобождении линий, представляющих собой элементарные события, скачкообразно меняется. Вероятность наступления в промежутке длины τ, по меньшей мере, одного элементарного события (того или другого типа) при $\tau \to 0$ асимптотически пропорциональна τ, а вероятность наступления в промежутке длины двух или более элементарных событий есть величина более высокого порядка малости $0(\tau)$.

Приведенные рассуждения позволяют найти асимптотические выражения переходных вероятностей $P_{ik}(\tau)$ при $\tau \to 0$. Если $|i - r| > 1$, то переход из состояния i в состояние k требует наступления, по меньшей мере, двух элементарных событий. Поэтому при $\tau \to 0$

$$P_{ik}(\tau) \approx 0 \left(|i - k|\right) > 1. \tag{5.20}$$

В свою очередь, для $P_{kk}(\tau)$ будет справедлива запись

$$P_{kk}(\tau) \approx 1 - \lambda\tau - n\beta t. \tag{5.21}$$

Преобразуя уравнение Чепмана – Колмогорова $P_{ik}(t_1 + t_2) = \sum_{r=0}^{n} P_{ir}(t_1) P_{rk}(t_2)$ с учетом формулы полной вероятности $P_k(t) = \sum_{r=0}^{n} P_i(0) P_{rk}(t)$ и применяя найденные асимптотические оценки находим

$$P_k(t+\tau) = P_{r-1}(t)P_{k-1,k}(\tau) + P_r(t)P_{kk}(\tau) + P_{r+1}(t)P_{k+1,k}(\tau) + 0(\tau) = \\ = P_{r-1}(t)\lambda\tau + P_r(t)(1-\lambda\tau - n\beta\tau) + P_{r+1}(t)n\beta t, \tag{5.22}$$

откуда, деля обе части уравнения на τ и устремляя $\tau \to 0$, получаем

$$P_k'(t) = \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + n\beta)P_k(t) + n\beta P_{k+1}(t) \ (k \ge n). \tag{5.23}$$

Опуская часть промежуточных преобразований, систему уравнений Колмогорова можно представить в виде

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + \beta P_1(t); \\ P_k'(t) = \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + n\beta)P_k(t) + (k+1)\beta P_{k+1}(t) \ (0 < k < n); \\ P_k'(t) = \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + n\beta)P_k(t) + n\beta P_{k+1}(t) \ (k \ge n). \end{cases} \tag{5.24}$$

В качестве вероятностей состояний примем пределы, к которым стремятся вероятности $P_k(t)$ при $t \to \infty$ [460]. Тогда левые части системы уравнений (5.24) обращаются в нуль, и она принимает вид

$$\begin{cases} -\lambda P_0(t) + \beta P_1(t) = 0; \\ \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + n\beta)P_k(t) + (k+1)\beta P_{k+1}(t) = 0 \ (0 < k < n); \\ \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + n\beta)P_k(t) + n\beta P_{k+1}(t) = 0 \ (k \ge n). \end{cases} \tag{5.25}$$

С учетом нормировочного условия $\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$, числа p_k находятся как

$$\begin{cases} p_k = \dfrac{u^k}{k!} \ p_0 \ (0 \le k \le n); \\ p_k = \dfrac{u^k}{n!n^{k-n}} \ p_0 \ (k > n), \end{cases} \tag{5.26}$$

где $u = \dfrac{\lambda}{\beta}$.

В свою очередь, значение p_0 определяется по формуле

$$\frac{1}{p_0} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{u^k}{k!} + \frac{n^n}{n!} \sum_{k=n}^{\infty} \left(\frac{u}{n}\right)^k = s_{n-1}(u) + \frac{u^n}{(n-1)!(n-u)}, \tag{5.27}$$

где $s_m(u) = \sum_{k=0}^{m} \left(\dfrac{u^k}{k!}\right)$.

Таким образом, вероятность найти все линии занятыми («вероятность ожидания ремонта») рассчитывается по выражению

$$\prod = \sum_{k=n}^{\infty} p_n = \frac{n^n p_0}{n!} \sum_{k=n}^{\infty} \left(\frac{u}{n}\right)^k = \frac{u^n}{n!} \frac{p_0}{1-\frac{u}{n}}. \tag{5.28}$$

Приняв за основу (5.28), можно найти вероятность $P\{\gamma > t\}$ того, что для вышедшего в произвольно выбранный момент времени из строя электродвигателя время ожидания ремонта будет больше t. Если обозначить через $P_k\{\gamma > t\}$ условную вероятность того же неравенства в предположении, что произведенный запрос застал систему в состоянии *k*, то по формуле полной вероятности [496]

$$P\{\gamma > t\} = \sum_{k=n}^{\infty} p_k P_k\{\gamma > t\}. \tag{5.29}$$

Очевидно, что при условии, когда в момент вызова все линии были заняты и имелось $\nu = k - n$ ожидающих ремонта двигателей, запрос получает обслуживание после ($\nu + 1$)-го освобождения линии. В этом случае искомая вероятность – это вероятность того, что за время *t* после появления вызова произойдет не более, чем ν освобождений линии. Предположим $q_r(t)$ $(0 \le r \le \nu)$ есть вероятность того, что за это время произойдет ровно r освобождений. Тогда

$$P_k\{\gamma > t\} = \sum_{r=0}^{k-n} q_r(t) \ (k \ge n). \tag{5.30}$$

Поток освобождений за время ожидания запроса является простейшим потоком с параметром $n\beta$, т. к. вероятность того, что не произойдет ни одного освобождения за время *t* после момента, когда все линии заняты, равна $\left(e^{-\beta t}\right)^n = e^{-\beta bt}$. Поскольку $q_r(t)$ есть вероятность того, что за время *t* наступит *r* событий этого потока, $P_k\{\gamma > t\}$ примет вид

$$P_k\{\gamma > t\} = \sum_{r=0}^{k-n} e^{-n\beta t} \frac{(n\beta t)^r}{r!} \ (k \ge n), \tag{5.31}$$

а $P\{\gamma > t\}$ согласно (5.29), (5.25) и (5.28) запишется как

$$P\{\gamma > t\} = \prod e^{-(n\beta - \lambda)t} \ (t \ge 0). \tag{5.32}$$

Таким образом, задачу можно считать решенной, отметив при этом, что в принятых нами условиях время ожидания подчиняется показательному закону распределения с параметром $n\beta - \lambda$.

5.2.1 Анализ систем с неограниченным потоком требований при ремонте электрических двигателей сторонними организациями

Осуществим определение среднего времени ожидания ремонта двигателей в случае, когда каждый ЭД может обслуживаться только одной линией. При этом количество линий, как было показано выше, определяется объемом на текущий момент времени финансовых возможностей.

На вход n-линейной системы массового обслуживания поступает поток вышедших из строя двигателей с плотностью λ. Плотность простейшего потока их обслуживания для каждой линии μ. Если вновь поступивший ЭД застает хотя бы одну линию свободной, он принимается на обслуживание и обслуживается до конца. Если все линии обслуживания оказываются занятыми, двигатель становится в очередь и ожидает ремонта [179].

Примем естественную дисциплину обслуживания – первый поступивший на обслуживание электродвигатель обслуживается в первую очередь. Выбор дисциплины очереди для пуассоновских систем влияет только на закон распределения времени пребывания заявки в очереди, и никакие вероятностные характеристики самой системы, ни даже среднее время пребывания заявки в очереди, не зависят от дисциплины очереди. Состояние рассматриваемой системы связано с числом заявок на ремонт, находящихся в системе:
x_k – в системе имеется k заявок ($k = 0, 1, 2, \ldots, n$), обслуживаемых k линиями;
x_{n+r} – в системе имеется $n + r$ заявок ($r = 1, 2, \ldots, m$): n из них обслуживаются и r заявок находятся в очереди, т. е. система имеет $n + m + 1$ состояний, граф которой представлен на рисунке 5.4 [2].

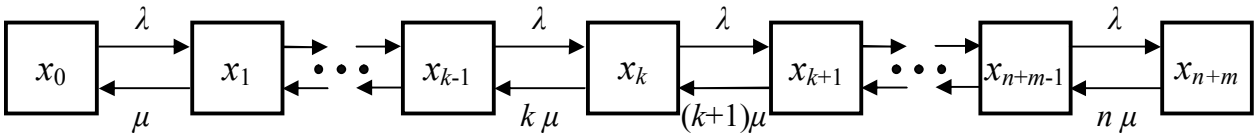


Рисунок 5.4 – Граф состояний системы с неограниченным потоком требований

Поскольку данный граф аналогичен изображенному на рисунке 5.3, система дифференциальных уравнений для вероятности состояний будет аналогична (5.11). Тогда воспользовавшись результатами решения системы (5.11), можно получить

$$p_k = \frac{\alpha^k}{k} p_0 \ (k = 0, 1, 2, ..., n); \ p_{n+r} = x^r p_n \ (r = 0, 1, 2, ..., m). \qquad (5.33)$$

Приняв нормировочное условие $\sum_{k=0}^{n} p_k + \sum_{r=1}^{m} p_{n+r} = 1$, находим

$$p_k = \frac{P(k,\alpha)}{R(n,\alpha) + P(n,\alpha)x\dfrac{1-x^m}{1-x}} \; (k = 0, 1, 2, ..., n), \tag{5.34}$$

где $P(k,\alpha)$ равна вероятности того, что случайная величина X, распределенная по закону Пуассона с параметром α, примет значение k; $R(k,\alpha)$ равна вероятности того, что случайная величина X примет значение не больше k.

Вероятность ремонта равна вероятности того, что двигатель, поступивший на обслуживание, застанет свободной хотя бы одну из линий, т. е. средства на его ремонт имеются

$$P_{обс} = \sum_{k=0}^{n+m-1} p_k = 1 - p_{n+m} = 1 - \rho x^m P(n,a) = 1 - x^m p_n, \tag{5.35}$$

где $$\alpha = \frac{\lambda}{\mu}; \quad x = \frac{\lambda}{n\mu}; \quad \rho = \left\{ \begin{array}{ll} \dfrac{1}{R(n,a) + P(n,a)x\dfrac{1-x^m}{1-x}}, & \text{при } x \neq 1 \\ \dfrac{1}{R(n,n) + P(n,n)m}, & \text{при } x = 1 \end{array} \right\}. \tag{5.36}$$

Так как $P_{обс} = \dfrac{\mu\bar{k}}{\lambda}$, где $\bar{k} = \sum_{k=0}^{n} kp_k + n\sum_{r=1}^{m} p_{n+r}$ – среднее число занятых линий, то

$$\bar{k} = \frac{\lambda}{\mu} P_{обс} = \alpha(1 - x^m p_n). \tag{5.37}$$

Вероятность полной загрузки системы равна вероятности того, что все обслуживающие линии системы являются занятыми (все ремонтные средства расходуются в полном объеме)

$$\pi_{п.з.} = \sum_{r=0}^{m} p_n + r = \rho P(n,\alpha)\sum_{r=0}^{m} x^r = p_n \frac{1-x^{m+1}}{1-x}. \tag{5.38}$$

Можно ввести понятие времени полной загрузки системы $T_{п.з.}$, т. е. времени однократного пребывания в состоянии x_n, которое распределяется по показательному закону с параметром $n\mu$. Решая соответствующие диффе-

ренциальные уравнения при начальных условиях $\widetilde{p}_{n-1}(0)=1,\ \widetilde{p}_n(0)=0$, можно получить среднее время полной загрузки системы

$$\bar{t}_{п.з.}=M(T_{п.з.})=\frac{1}{n\mu}. \tag{5.39}$$

В свою очередь, функция распределения времени неполной загрузки системы $T_{н.з}$ определяется из равенства

$$F_{н.з.}(t)=P(T_{н.з.}<t)=\widetilde{p}_n(t) \tag{5.40}$$

при плотности распределения времени неполной загрузки системы

$$f_{н.з.}(t)=\frac{d}{dt}F_{н.з.}(t)=\frac{d}{dt}\widetilde{p}_n(t)=\lambda\widetilde{p}_{n-1}(t). \tag{5.41}$$

Тогда среднее время неполной загрузки системы находится из выражения

$$\bar{t}_{н.з.}=\bar{t}_{п.з.}\frac{1-\pi_{п.з.}}{\pi_{п.з.}}=\frac{1}{n\mu}\frac{R(n-1,\alpha)}{P(n,\alpha)}, \tag{5.42}$$

т. к. вероятность $\pi_{п.з.}$ того, что система полностью загружена, равна отношению среднего времени полной загрузки системы к сумме средних времен полной и неполной загрузки системы.

Функция распределения времени наличия очереди в системе $T_{н.о.}$ определяется по формуле

$$F_{н.о.}(t)=\widetilde{p}_n(t). \tag{5.43}$$

Тогда среднее время наличия очереди (т. е. среднее время пребывания системы в группе состояний $\widetilde{x}_{n+1},...,\widetilde{x}_{n+m}$) будет

$$\bar{t}_{н.о.}=\widetilde{t}_{\widetilde{x}_n}\frac{1-\widetilde{p}_n}{\widetilde{p}_n}=\frac{1}{\lambda}x\frac{1-x^m}{1-x}. \tag{5.44}$$

При отсутствии в системе к моменту окончания обслуживания очереди, среднее время занятости линии будет равно $\frac{1}{\mu}$, но если к моменту окончания обслуживания в системе будет очередь (вероятность данной гипотезы равна

$p_{н.о.}$), то среднее время занятости линии будет равно $\frac{1}{\mu}+\bar{t}_{н.о.}$. Данное среднее время, воспользовавшись формулой полного математического ожидания, можно найти из выражения

$$\bar{t}_{з.к.}=(1-p_{н.о.})\frac{1}{\mu}+p_{н.о.}(\frac{1}{\mu}+\bar{t}_{н.о.})=\frac{1}{\mu}+p_{н.о.}\bar{t}_{н.о.}, \tag{5.45}$$

Где

$$p_{н.о.}=\sum_{r=1}^{m}p_{n+r}=\sum_{r=1}^{m}p_n x^r=p_n x\frac{1-x^m}{1-x} \tag{5.46}$$

есть вероятность наличия очереди в системе обслуживания [2].

Среднее время простоя линии определяется как

$$\bar{t}_{п.к.}=\bar{t}_{з.к.}\frac{\pi_{з.к.}}{1-\pi_{з.к.}}. \tag{5.47}$$

Среднее число электродвигателей $\bar{r}$, находящихся в очереди и ожидающих обслуживания, рассчитывается по формулам

$$\begin{gathered}\bar{r}=\sum_{r=1}^{m}rp_{n+r}=p_n x\frac{1-x^m\left[m(1-x)+1\right]}{(1-x)^2},\quad (x\neq 1);\\ \bar{r}=\sum_{r=1}^{m}r\rho P(n,\alpha)=\rho P(n,n)\frac{m(m+1)}{2}=p_n\frac{m(m+1)}{2},\quad (x=1).\end{gathered} \tag{5.48}$$

Завершим анализ СМО отысканием среднего времени нахождения электродвигателя в очереди $\bar{t}_{оч}$. Опуская промежуточные преобразования запишем [456]

$$\bar{t}_{оч}=\frac{\bar{r}}{\lambda}. \tag{5.49}$$

Тогда среднее время нахождения вышедшего из строя двигателя в системе

$$\bar{t}=\frac{\bar{r}+\bar{k}}{\lambda}=\frac{\bar{l}}{\lambda}, \tag{5.50}$$

где $\bar{l}$ – среднее число вышедших из строя ЭД, находящихся в системе.

В заключение рассмотрим случай, когда вероятность успешного обслуживания заявки, побывавшей на обслуживании, меньше единицы, а все характеристики системы, кроме вероятности обслуживания $P_{обс}$, остаются неизменными. В этом случае вероятность $P_{обс}$ можно определить по формуле

$$P_{обс} = p(1 - p_{n+m}) \tag{5.51}$$

при абсолютной пропускной способности

$$\lambda_0 = \lambda P_{обс} = \lambda p(1 - p_{n+m}). \tag{5.52}$$

Стационарный режим работы рассматриваемой системы при этом существует только при условии, что среднее число электродвигателей, обслуживаемых в единицу времени всеми линиями, должно быть больше среднего числа ремонтных заявок, поступающих в систему в единицу времени. Если это условие не выполняется и число мест в очереди ожидания не ограничено, то стационарный режим работы будет отсутствовать. Другими словами, при $x = \dfrac{\lambda}{n\mu} > 1$ система будет неограниченно двигаться «вправо» (перемещаться в сторону состояний с большим числом r), и очередь будет неограниченно возрастать. Стабилизации данного движения вправо трудно ожидать, т. к. система массового обслуживания с неограниченным потоком требований не справляется с потоком заявок, что приводит к постоянному увеличению очереди.

5.2.2 Показатели функционирования хозяйства при собственной системе ремонта отказавших электродвигателей

Рассматриваемая собственная система обслуживания характеризуется постоянным количеством ремонтных линий, что дает возможность обслуживания одного двигателя сразу несколькими линиями, обеспечивая полную взаимопомощь между ними.

Осуществим постановку задачи исследования. На вход n-линейной системы массового обслуживания поступает простейший поток ремонтных заявок с интенсивностью λ. Интенсивность потока обслуживания каждой линии μ. Если электрический двигатель застает все линии свободными, то он принимается на обслуживание всеми линиями одновременно. Производительность при этом увеличивается в n раз. После окончания обслуживания все линии освобождаются одновременно. Если вновь прибывшая заявка застает в системе одну заявку, то она принимается на обслуживание: часть линий обслуживает первую заявку, часть – вторую. Разделение линий приблизительно равномерное. Если в системе обслуживалось k двигателей ($k = 0, 1, \ldots, n - 1$), то поступивший ЭД прини-

мается на обслуживание n линиями, распределяясь произвольно между заявками, но так, что все линии обслуживания оказываются занятыми. При наличии в системе n электродвигателей, вновь прибывший ЭД встает в очередь и ожидает освобождения хотя бы одной из линий. Если в системе имеет место $n + r$ заявок на ремонт (n из них обслуживаются и r ожидают в очереди, $r = 0, 1, 2, \ldots, m - 1$), то вновь прибывшая заявка становится в очередь. Попавшие в систему заявки (на обслуживание или в очередь) обслуживаются до конца. Величины n, λ, μ, m являются параметрами данной системы массового обслуживания.

Если число отказавших двигателей связать с состоянием системы, то тогда:

x_k – в системе имеется k ремонтных заявок ($k = 0, 1, 2, \ldots, n$), обслуживаемых всеми n линиями общей производительностью $n\mu$;

x_{n+r} – в системе имеется $n + r$ заявок ($r = 1, 2, \ldots, m$): n из них обслуживаются и r заявок находятся в очереди.

Размеченный граф состояний рассматриваемой системы в общем виде представлен на рисунке 5.5, на основе которого можно составить систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний, справедливую не только для постоянных, но и для переменных $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ [2].

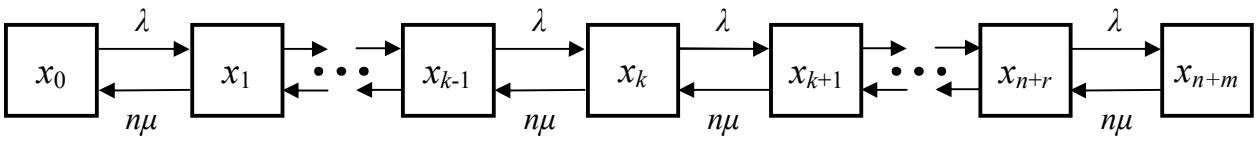


Рисунок 5.5 – Граф состояний собственной системы массового обслуживания

Так как система обладает эргодическим свойством, имеет место стационарный режим работы СМО (при λ = const, μ = const, $m < \infty$, $t \to \infty$), что можно описать системой алгебраических уравнений:

$$\left.\begin{array}{l} 0 = -\lambda p_0 + n\mu p_1; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0 = -(\lambda + n\mu)p_k + \lambda p_{k-1} + n\mu p_{k+1} \ (k = 1, 2, \ldots, n-1); \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0 = -n\mu p_n + \lambda p_{n-1}. \end{array}\right\} \qquad (5.53)$$

Введя обозначения $u_i = -\lambda p_{i-1} - n\mu p_i \ (i = 1, 2, \ldots, n)$, получим

$$\left.\begin{array}{l} u_1 = 0; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \mu_{k+1} - u_k = 0 \ (k = 1, 2, \ldots, n); \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_n = 0, \end{array}\right\} \tag{5.54}$$

и, соответственно,

$$p_k = \left(\frac{\lambda}{n\mu}\right)^k p_0 \ (k = 0, 1, \ldots, n). \tag{5.55}$$

Тогда с учетом обозначения

$$x = \frac{\lambda}{n\mu} = \frac{\alpha}{n}, \tag{5.56}$$

где величина x равна среднему числу электродвигателей, поступающих в систему за время обслуживания одного из них всеми n линиями, получим

$$p_k = x^k p_0. \tag{5.57}$$

Из нормировочного условия $\sum_{k=0}^{n} p_k = p_0 \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x} = 1$ найдем вероятность p_0

$$p_0 = \frac{1 - x}{1 - x^{n+1}} \tag{5.58}$$

и, следовательно, вероятность p_k

$$\begin{gathered} p_k = x^k \frac{1 - x}{1 - x^{n+1}} \ (k = 0, 1, \ldots, n; \ x \neq 1); \\ p_k = \frac{1}{n+1} (k = 0, 1, \ldots, n; \ x = 1), \end{gathered} \tag{5.59}$$

т. е. все состояния будут равновероятны.

Среднее число вышедших из строя электрических двигателей, присутствующих в системе, находится из выражения [456]

$$\bar{l} = \sum_{i=0}^{n+m} l p_i = \left\{ \begin{array}{ll} x \dfrac{1 - x^{n+m}[(n+m)(1-x)+1]}{(1 - x^{n+m+1})(1-x)}, & (x \neq 1); \\ \dfrac{n+m}{2}, & (x = 1), \end{array} \right\} \tag{5.60}$$

а вероятность обслуживания заявки равна вероятности того, что поступившая на обслуживание заявка застанет свободным хотя бы одно место в очереди

$$P_{обс} = \sum_{i=0}^{n+m-1} p_i = 1 - p_{n+m} = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{1 - x^{n+m}}{1 - x^{n+m+1}} \text{ при } x \neq 1; \\ \dfrac{n+m}{n+m+1} \text{ при } x = 1. \end{array} \right\} \tag{5.61}$$

В свою очередь, среднее число занятых линий определяется как

$$\bar{k} = a P_{обс} = \left\{ \begin{array}{l} a \dfrac{1 - x^{n+m}}{1 - x^{n+m+1}} \text{ при } x \neq 1; \\ n \dfrac{n+m}{n+m+1} \text{ при } x = 1, \end{array} \right\} \tag{5.62}$$

в то время, как среднее число обслуживаемых двигателей находится по формуле

$$\bar{s} = \sum_{i=0}^{n} l p_i + n \sum_{i=n+1}^{n+m} p_i = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{x}{1 - x^{n+m+1}} \left\{ \dfrac{1 - x^n [n(1-x)+1]}{1-x} + n[x^n - x^{n+m}] \right\} (x \neq 1); \\ \left[\dfrac{n(n+1)}{2} + nm \right] \dfrac{1}{n+m+1} \ (x = 1). \end{array} \right\} \tag{5.63}$$

Вероятность того, что линия занята, определяется как

$$\pi_{з.к.} = 1 - p_0 = \frac{\bar{k}}{n} = \left\{ \begin{array}{l} x \dfrac{1 - x^{n+m}}{1 - x^{n+m+1}} \ (x \neq 1); \\ \dfrac{n+m}{n+m+1} \quad (x = 1), \end{array} \right\} \tag{5.64}$$

а вероятность того, что система полностью загружена –

$$\begin{gathered} \pi_{п.з.} = \sum_{r=0}^{m} p_{n+r} = \sum_{r=0}^{m} x^{n+r} \frac{1-x}{1 - x^{n+m+1}} = p_n \sum_{r=0}^{m} x^r = x^n \frac{1 - x^{m+1}}{1 - x^{n+m+1}}, (x \neq 1); \\ \pi_{п.з.} = \frac{m+1}{n+m+1}, (x = 1). \end{gathered} \tag{5.65}$$

В свою очередь, среднее время простоя ремонтной линии рассчитывается как

$$\bar{t}_{п.к.} = \frac{1}{\lambda}. \tag{5.66}$$

Тогда на основании эргодического свойства среднее время простоя линии находится из выражения

$$\bar{t}_{з.к.} = \bar{t}_{п.к.} \frac{\pi_{п.к.}}{1-\pi_{з.к.}}, \tag{5.67}$$

а среднее время неполной загрузки системы – по формуле

$$\begin{gathered} \bar{t}_{н.з.} = \frac{1}{n\mu} \frac{1-x^n \dfrac{1-x}{1-x^{n+1}}}{x^n \dfrac{1-x}{1-x^{n+1}}} = 1 \frac{1}{n\mu} \frac{1-x^n}{x^n(1-x)}, (x \neq 1); \\ \bar{t}_{н.з.} = \frac{1}{\mu}, \ (x=1). \end{gathered} \tag{5.68}$$

На основании эргодического свойства найдем и среднее время полной загрузки системы

$$\bar{t}_{п.з.} = \bar{t}_{н.з.} \frac{\pi_{п.з.}}{1-\pi_{п.з.}}. \tag{5.69}$$

Для рассматриваемой системы массового обслуживания среднее число заявок $\bar{r}$, находящихся в очереди:

$$\bar{r} = \sum_{r=1}^{m} r p_{n+r} = \sum_{r=0}^{m} x^n x^r \frac{1-x}{1-x^{n+m+1}} r = p_n \sum_{r=0}^{m} r x^r = p_n x \frac{1-x^m[m(1-x)+1]}{(1-x)^2}, (x \neq 1), \tag{5.70}$$

где $p_n = x^n \dfrac{1-x}{1-x^{n+m+1}}$ – вероятность того, что в системе будет n заявок, т. е. очередь будет отсутствовать;

$$\bar{r} = p_n \frac{m(m+1)}{2}, \ (x=1), \tag{5.71}$$

где $p_n = \dfrac{1}{n+m+1}$.

При этом при любых значениях x среднее число отказавших двигателей $\bar{l}$ в системе равно сумме числа обслуживаемых ЭД $\bar{s}$ и числа ожидающих в очереди $\bar{r}$.

Если имеет место очередь, то рассматриваемая система работает аналогично СМО без взаимопомощи между линиями, поэтому среднее время пребывания заявки в очереди

$$\bar{t}_{оч} = \frac{\bar{r}}{\lambda}. \tag{5.72}$$

Закон распределения времени нахождения ЭД в очереди отыскивается аналогично для случая СМО без взаимопомощи между линиями:

$$\begin{gathered} P(T_{оч} > t) = \frac{p_n}{1-x}[e^{-n\mu(1-x)t}R(m-1, \lambda t) - x^m R(m-1, n\mu t)], (x \neq 1); \\ P(T_{оч} > t) = p_n[mR(m-1), n\mu t) - n\mu t R(m-2, n\mu t)], \ (x = 1). \end{gathered} \tag{5.73}$$

По выражению

$$f_{оч}(t) = \begin{cases} p_n n\mu e^{-(n\mu-\lambda)t}R(m-1, \lambda t) + \sigma(t)\left[1 - p_n \dfrac{1-x^m}{1-x}\right], (x \neq 1); \\ p_n \lambda R(m-1, \lambda t) + \sigma(t)(1 - p_n m), \qquad (x = 1) \end{cases} \tag{5.74}$$

рассчитаем плотность распределения времени нахождения в очереди.

Если число мест в очереди $m = \infty$, то стационарный режим существует только при $x < 1$, а $P_{обс} = 1$.

Таким образом, для собственной системы обслуживания электрических двигателей на сельскохозяйственном предприятии были определены показатели ее функционирования, аналогично тому, как это было описано в п. 5.2.1.

Проведенный анализ СМО при условии, что выходящие из строя электродвигатели и система их ремонта не связаны между собой, позволил найти такие характеристики СМО, как вероятность безубыточной работы хозяйства, среднее число вышедших из строя двигателей, находящихся в системе, среднее число заявок, находящихся в очереди, среднее число занятых линий и ряд других показателей. Однако такие важные параметры системы, как коэффициент оперативного использования и простоя техники, возможно найти, рассмотрев СМО как замкнутую систему.

Состояние СМО для любого предприятия АПК связано с интенсивностью потока ремонтных заявок, а сами источники заявок являются не внешними, а внутренними ее элементами. В процессе обслуживания клиент (двигатели) перестает подавать заявки, а после конца обслуживания вновь становится источником заявок. Системы с подобным режимом являются замкнутыми системами массового обслуживания [497].

Упрощенная схема изменения состояния каждого ЭД изображена на рисунке 5.6. При этом каждый отказавший двигатель сразу же снимается с эксплуатации.

Рисунок 5.6 – Схема перехода электродвигателя
из одного состояния в другое

Показанное на рисунке состояние «электродвигатель работает» заключается в том, что он не нуждается в обслуживании и генерирует поток отказов с интенсивностью λ. В случае отказа его направляют в ремонт. При наличии возможности ремонта ЭД принимается. В противном случае двигатели вынуждены ожидать обслуживания. После высвобождения мест обслуживания электрические двигатели принимаются на обслуживание. Места обслуживания являются линиями обслуживания. В состояниях «электродвигатель ожидает обслуживания» и «двигатель обслуживается» он не генерирует поток заявок.

Поскольку для рассмотрения приняты пуассоновские системы массового обслуживания, будем считать, что каждая линия обеспечивает пуассоновский поток ремонтов с интенсивностью μ, а каждый электродвигатель порождает пуассоновский поток отказов с интенсивностью λ, если он находится в состоянии «работает» [467].

Введем обозначения: m – общее число двигателей, подлежащих обслуживанию, $R(t)$ – случайное число ЭД, ожидающих очереди на обслуживание в момент времени t, $S(t)$ – случайное число обслуживаемых электродвигателей в момент времени t и $H(t)$ – случайное число двигателей, не нуждающихся в обслуживании в момент времени t.

Равенство

$$m = R(t) + S(t) + H(t) \tag{5.75}$$

имеет место для любого момента времени t. Переходя к математическим ожиданиям, получим

$$m = \bar{r}(t) + \bar{s}(t) + \bar{h}(t). \tag{5.76}$$

Для стационарных режимов работы замкнутых СМО

$$m = \bar{r} + \bar{s} + \bar{h}\ . \tag{5.77}$$

Уравнение (5.77), для которого величины, входящие в него, не зависят от времени, называется уравнением расхода для замкнутой системы.

Вероятность отсутствия необходимости в обслуживании электродвигателя (коэффициент использования), определим по формуле

$$\xi = \frac{\bar{h}}{m} = 1 - \frac{\bar{r} + \bar{s}}{m}, \tag{5.78}$$

а вероятность того, что двигатель будет нуждаться в обслуживании, рассчитаем по выражению

$$\varsigma = 1 - \xi = \frac{\bar{r} + \bar{s}}{m}. \tag{5.79}$$

В свою очередь, вероятность того, что ЭД находится на обслуживании, можно записать как

$$\phi = \frac{\bar{s}}{m}. \tag{5.80}$$

В итоге вероятность того, что электродвигатель находится в очереди (ожидает обслуживания), определится по выражению

$$\frac{\bar{r}}{m} = \varsigma - \phi. \tag{5.81}$$

Если ввести временные характеристики [498]:

$\bar{t}_{оч}$ – среднее время пребывания электродвигателя в очереди;

$\bar{t}_{обс}$ – среднее время однократного ремонта ЭД (время обслуживания);

$\bar{t}_{р}$ – среднее время однократной работы двигателя, т. е. среднее время, протекающее с момента окончания последнего обслуживания до появления неисправности (подачи очередной заявки), то на основании эргодического свойства будут выполняться следующие равенства:

$$\phi = \frac{\bar{t}_{обс}}{\bar{t}_{оч} + \bar{t}_{обс} + \bar{t}_{р}}; \tag{5.82}$$

$$\xi = \frac{\bar{t}_{р}}{\bar{t}_{оч} + \bar{t}_{обс} + \bar{t}_{р}}; \tag{5.83}$$

$$\varsigma - \xi = \frac{\bar{t}_{оч}}{\bar{t}_{оч} + \bar{t}_{обс} + \bar{t}_{р}}. \tag{5.84}$$

Нетрудно заметить, что среднее время полного цикла обращения электрического двигателя складывается из времени однократного пребывания его в очереди, времени обслуживания и времени однократной работы, т. е. $\bar{t}_{ц} = \bar{t}_{оч} + \bar{t}_{обс} + \bar{t}_{р}$.

Осуществим постановку задачи по определению показателей работы замкнутой системы массового обслуживания ЭД без взаимопомощи между линиями. Допустим имеется m электродвигателей, каждый из которых может в некоторый случайный момент времени нуждаться в ремонте. Поток отказов каждого двигателя – пуассоновский с интенсивностью λ. Каждый ЭД может обслуживаться только одной из линий. Интенсивность пуассоновского потока обслуживания каждой линии равна μ. Если к моменту отказа электродвигателя все линии заняты, то он должен встать в очередь на обслуживание. Дисциплина очереди естественная – первый поступивший двигатель обслуживается первым.

Установим связь состояния СМО с числом отказавших электродвигателей:

x_k – отказало ровно k двигателей (k = 0, 1, 2, …, n) и все они обслуживаются;

x_{n+r} – отказало $n + r$ ЭД, из которых n обслуживается и r ожидают в очереди (r = 0, 1, 2, …, $m – n$).

Размеченный граф состояний системы с указанием плотности потоков, переводящих систему из одного состояния в другое, приведен на рисунке 5.7 [2].

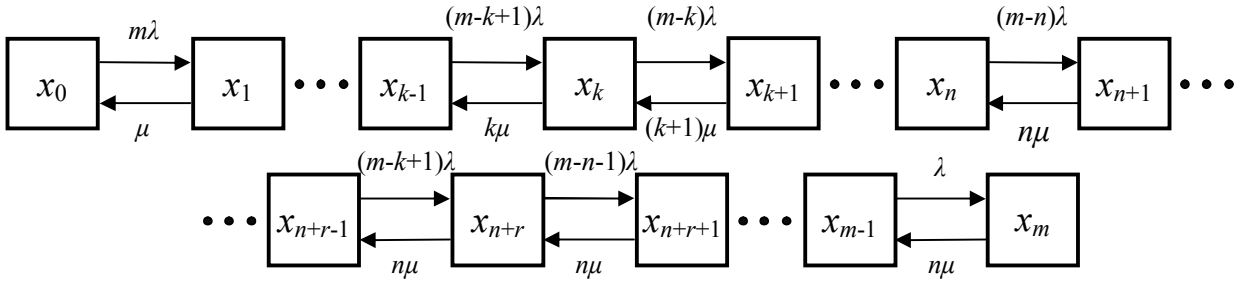


Рисунок 5.7 – Граф состояний замкнутой СМО без взаимопомощи между линиями

Система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний системы в соответствии с данным графом запишется как

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{dp_0(t)}{dt} = -m\lambda p_0(t) + \mu p_1(t);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&\frac{dp_k(t)}{dt} = -[\lambda(m-k) + k\mu]p_k(t) + \lambda(m-k+1)p_{k-1}(t) +\\
&\quad + (k+1)\mu p_{k+1}(t)\,(k = 1, 2, ..., n-1);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&\frac{dp_n(t)}{dt} = -[(m-n)\lambda + n\mu]p_n(t) + (m-n+1)\lambda p_{n-1}(t) + nup_{n+1}(t);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&\frac{dp_{n+r}(t)}{dt} = -[(m-n-r)\lambda + n\mu]p_{n+r}(t) +\\
&\quad + (m-n-r+1)\lambda p_{n+r}(t) n\mu p_{n+r+1}\,(r = 1, 2, ..., m-n);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&\frac{dp_m(t)}{dt} = -n\mu p_m(t) + \lambda p_{m-1}(t).
\end{aligned}\right\} \qquad (5.85)$$

Для стационарного режима работы СМО λ = const, μ = const, $t \to \infty$. В этом случае вместо системы дифференциальных уравнений (5.85), приравняв все производные к нулю, можно получить систему алгебраических уравнений.

Выполнив решение полученной системы алгебраических уравнений, найдем

$$p_k = \frac{m!}{k!(m-k)!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k p_0 = C_m^k a^k p_0 \;\; (k = 0, 1, 2, ..., n), \qquad (5.86)$$

где $C_m{}^k a^k$ вычисляется по таблицам биноминального распределения

$$C_m{}^k a^k = \frac{B(m,k,p)}{q^m}; \qquad (5.87)$$

$$\left.\begin{aligned}
&p = \frac{a}{1+a}\;(0 \le p \le 1);\\
&q = 1 - p;
\end{aligned}\right\} \qquad (5.88)$$

$$B(m,k,p) = C_m^k p^k q^{m-k}.$$

Вероятность p_{n+r} $(r = 0, 1, 2, ..., m-n)$ находится из выражения

$$p_{n+r} = \frac{m!}{n^r n!(m-n-r)!} a^{n+r} p_0 = \frac{p(n,n)P(m-n-r,x)}{P(0,n)P(m,x)} p_0, \qquad (5.89)$$

где $P(m,a) = \frac{a^m}{m!} e^{-q}$; $x = \frac{n\mu}{\lambda} = \frac{n}{a}$.

Из нормировочного условия $\sum_{k=0}^{n} p_k + \sum_{r=1}^{m-n} p_{n+r} = 1$ определяем

$$p_0 = \frac{1}{\frac{R(m,n,p)}{q^m} + \frac{P(n,n)R(m-n-1,x)}{P(0,n)P(m,x)}}, \qquad (5.90)$$

где

$$R(m,n,p) = \sum_{k=0}^{n} B(m,k,p) = \sum_{k=0}^{n} C_m^k p^k q^{m-k}; \qquad (5.91)$$

$$R(m,x) = \sum_{k=0}^{m} P(k,a) = \sum_{k=0}^{m} \frac{a^k}{k!} e^{-q}. \qquad (5.92)$$

Таблицы функций (5.91) и (5.92) приведены в [498]. Таким образом, окончательные выражения для вероятностей состояний p_k, p_{n+r}, p_0 получаем в виде

$$\left.\begin{aligned} p_k &= \frac{B(m,k,p)}{q_m} p_0 \ (k = 0,1,2,...,n); \\ p_{n+r} &= \frac{P(n,n)P(m-(n+r),x)p_0}{P(0,n)P(m,x)} \ (r = 0,1,2,...,m-n); \\ p_0 &= \frac{1}{\frac{R(m,n,p)}{q^m} + \frac{P(n,n)R(m-n-1,x)}{P(0,n)P(m,x)}}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.93)$$

Среднее число обслуживаемых электродвигателей и среднее число двигателей, ожидающих в очереди на обслуживание, определим, соответственно, из выражений:

$$\bar{k} = \sum_{k=0}^{n} k p_k + n \sum_{r=1}^{m-n} p_{n+r} = \frac{p_0}{q^m} \sum_{k=0}^{n} k B(m,k,p) + \frac{n p_0 P(m,n) R(m-n-1,x)}{P(0,n)P(m,x)}; \qquad (5.94)$$

$$\bar{r} = \sum_{r=0}^{m-n} r p_{n+r} = \frac{P(n,n)p_0}{P(0,n)P(m,x)}[(m-n)R(m-n,x) - xR(m-n-1,x)]. \qquad (5.95)$$

Тогда число простаивающих (не работающих) ЭД найдем по формуле

$$\bar{l} = \bar{k} + \bar{r}. \qquad (5.96)$$

Работу рассматриваемой системы наиболее качественно характеризует вероятность ξ того, что определенный электродвигатель в любой момент времени будет работать. Ее принято называть коэффициентом использования (коэффициентом оперативного использования) техники

$$\xi = 1 - \frac{\bar{l}}{m}. \qquad (5.97)$$

С увеличением коэффициента ξ интенсивность работы техники возрастает, а время простоя – сокращается. Тогда коэффициент простоя техники ς

$$\varsigma = 1 - \xi \frac{\bar{l}}{m}. \qquad (5.98)$$

Вероятность того, что электрический двигатель будет работать, рассчитывается на основании эргодического свойства

$$\xi = \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_p + \bar{t}_n}, \qquad (5.99)$$

где $\bar{t}_p = \frac{1}{\lambda}$ – среднее время безотказной работы электродвигателя.

Следовательно, среднее время простоя ЭД $\bar{t}_n$ будет

$$\bar{t}_n = \bar{t}_p \frac{1-\xi}{\xi}. \qquad (5.100)$$

Время простоя T_n складывается из времени ожидания в очереди $T_{оч}$ и времени обслуживания $T_{обс}$. Для отыскания среднего времени ожидания двигателя в очереди можно воспользоваться теоремой сложения математических ожиданий

$$\bar{t}_n = M[T_n] = M[T_{оч}] + M[T_{обс}] = \bar{t}_{оч} + \bar{t}_{обс}. \qquad (5.101)$$

Зная среднее время обслуживания ЭД $\bar{t}_{обс}$, равное $\frac{1}{\mu}$, находим

$$\bar{t}_{оч} = \bar{t}_n - \bar{t}_{обс} = \frac{1}{\lambda}\frac{1-\xi}{\xi\omega} - \frac{1}{\mu}. \qquad (5.102)$$

Определим закон распределения времени ожидания в очереди $T_{оч}$, функция распределения которого $F_{оч}(t)$ терпит разрыв в точке $t = 0$, т. к. существует определенная вероятность того, что это время будет равно нулю

$$P(T_{оч} = 0) = \sum_{k=0}^{n-1} p_k. \qquad (5.103)$$

Условная плотность распределения времени ожидания в очереди $f_r(t)$ при условии, что к моменту отказа электродвигателя система будет находиться в состоянии x_{n+r}, т. е. в очереди будет находиться r двигателей $(0 \le r \le m-n-1)$ и все n линий будут заняты обслуживанием запишется как

$$f_r(t) = \frac{n\mu(n\mu t)^r}{r!} e^{-n\mu t} \ (t > 0). \qquad (5.104)$$

Данная зависимость подчиняется закону распределения Эрланга r-порядка с параметром $n\mu$. Объяснить это можно тем, что очередная заявка на ремонт будет обслужена лишь после того, как все n линий проведут (r + 1) циклов обслуживания. Следовательно, безусловная плотность распределения времени ожидания в очереди будет иметь вид

$$f_{оч}(t) = \delta(t)\sum_{k=0}^{n-1} p_k + \sum_{k=0}^{m-n-1} \frac{n\mu(n\mu t)^r}{r!} e^{-n\mu t} p_{n+r} \ (t > 0). \qquad (5.105)$$

Продолжительность простоя ЭД определяется как сумма времени нахождения в очереди $T_{оч}$ и времени ремонта $T_{обс}$. Так как величины $T_{оч}$ и $T_{обс}$ независимы, плотность распределения времени простоя можно найти как композицию двух законов

$$f_n(t) = \int_0^t \mu e^{-\mu\tau} f_{оч}(t-\tau) d\tau \ (t > 0). \qquad (5.106)$$

В свою очередь, вероятность того, что ожидать обслуживания будет r двигателей, можно найти по формуле

$$p_{1+r} = \frac{P(m-(r+1),x)}{P(m,x)} p_0, \tag{5.107}$$

а вероятность p_0 – из условия $\sum_{l=0}^{m} p_0 \frac{P(m-l,x)}{P(m,x)} = p_0 \frac{R(m,x)}{P(m,x)} = 1,$ откуда

$$p_0 = \frac{P(m,x)}{R(m,x)}; \tag{5.108}$$

$$p_l = \frac{P(m-l,x)}{R(m,x)} \ (l = 0,1,...,m), \tag{5.109}$$

где p_l – вероятность того, что в обслуживании нуждается l электродвигателей $(l = 0,1,...,m)$, т. е. l двигателей простаивает.

Для среднего числа простаивающих ЭД справедливо выражение

$$\begin{aligned} \bar{l} &= \sum_{l=0}^{m} l \frac{P(l-m,x)}{R(m,x)} = \frac{1}{R(m,x)} \sum_{l=0}^{m} [m-(m-l)] P(m-l,x) = \\ &= \frac{1}{R(m,x)} \left[m \sum_{l=0}^{m} P(m-l,x) - \sum_{l=0}^{m} (m-l) P(m-l,x) \right] = \\ &= \frac{1}{R(m,x)} \left[m \sum_{l=0}^{m} P(l,x) - \sum_{l=0}^{m} l P(l,x) \right] = m - x \frac{R(m-1,x)}{R(m,x)} = m - x(1-p_0), \end{aligned} \tag{5.110}$$

а для среднего количества обслуживаемых электродвигателей, равного среднему числу занятых линий $\bar{k}$, – выражение

$$\bar{s} = \bar{k} = 1 - p_0 = 1 - \frac{P(m,x)}{R(m,x)} = \frac{R(m-1,x)}{R(m,x)}. \tag{5.111}$$

Тогда среднее число ЭД, ожидающих в очереди, найдем следующим образом

$$\bar{r} = \bar{l} - \bar{s} = m - (x+1) \frac{R(m-1,x)}{R(m,x)} = m - (x+1)(1-p_0). \tag{5.112}$$

Коэффициент использования техники ξ определяем как

$$\xi = 1 - \frac{\bar{l}}{m} = 1 - \frac{m - x \frac{R(m-1,x)}{R(m,x)}}{m} = \frac{x}{m} \frac{R(m-1,x)}{R(m,x)} = \frac{x}{m}(1-p_0). \tag{5.113}$$

Тогда формула расчета среднего времени простоя ЭД примет следующий вид

$$\bar{t}_n = \bar{t}_p \frac{1-\xi}{\xi} = \frac{1}{\lambda} \frac{1-\frac{x}{m}(1-p_0)}{\frac{x}{m}(1-p_0)} = \frac{1}{\mu} \frac{m-x(1-p_0)}{1-p_0} = \frac{1}{\mu} \frac{\bar{l}}{1-p_0}, \qquad (5.114)$$

а среднее время нахождения двигателей в очереди

$$\bar{t}_{оч} = \bar{t}_n - \bar{t}_{обс} = \frac{1}{\mu} \frac{m-x(1-p_0)}{1-p_0} - \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{\bar{r}}{1-p_0}. \qquad (5.115)$$

Плотность распределения времени простоя ЭД запишется следующим образом

$$f_n(t) = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\mu(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t} p_k = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\mu(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t} \frac{P(m-k,x)}{R(m,x)} =$$
$$= \frac{\mu e^{-\mu t} e^{-x}}{R(m,x)} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(\mu t)^k}{k!} \frac{x^{m-k}}{(m-k)!} = \frac{\mu e^{-\mu t} e^{-x} x^m}{R(m,x)[q(t)]^m} \sum_{k=0}^{m-1} C_m^k [p(t)]^k [q(t)]^{m-k}, \qquad (5.116)$$

где $p(t) = \frac{\lambda t}{1+\lambda t} (t \geq 0); \quad q(t) = 1 - p(t).$

С учетом выражения $\sum_{k=0}^{m-1} C_m^k p_k q^{m-k} = 1 - p^m$, полученного из свойств биноминального распределения, найдем плотность распределения времени простоя

$$f_n(t) = \frac{\mu e^{-\mu t} P(m,x)}{R(m,x)} \frac{1-[p(t)]^m}{[1-p(t)]^m} = \mu e^{-\mu t} p_0 \frac{1-\left(\frac{\lambda t}{1+\lambda t}\right)^m}{\left(\frac{1}{1+\lambda t}\right)^m} =$$
$$= \mu e^{-\mu t} p_0 [(1+\lambda t)^m - (\lambda t)^m]. \qquad (5.117)$$

Исходя из этого, плотность распределения времени ожидания в очереди

$$f_{оч}(t) = \delta(t) p_0 + \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\mu(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t} p_k = \delta(t) p_0 +$$
$$\mu e^{-\mu t} p_0 \frac{1-[q(t)]^m - [p(t)]^m}{[q(t)]^m} = p_0 \left\{ \delta(t) + \mu e^{-\mu t} [(1+\lambda t)^m - (\lambda t)^m] \right\}. \qquad (5.118)$$

В свою очередь, для анализа замкнутой системы массового обслуживания с полной взаимопомощью между линиями, граф состояний которой приведен на рисунке 5.8, введем следующие состояния: x_0 – все электрические двигатели работают, линии обслуживания свободны; x_k – отказало ровно k электродвигателей, которые обслуживаются n линиями, распределенными приблизительно равномерно между ЭД; x_{n+r} – отказало ровно $n + r$ двигателей $(r = 0, 1, 2, ..., (m-n))$, из которых n обслуживается n линиями и r ожидает в очереди на обслуживание.

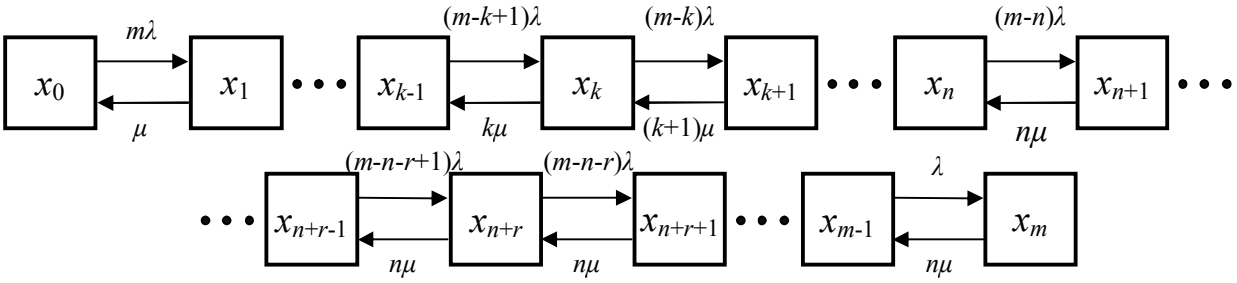


Рисунок 5.8 – Размеченный граф состояний замкнутой системы массового обслуживания с полной взаимопомощью между линиями

В соответствии с (5.109) p_k и p_{n+r} будут:

$$p_k = \frac{P(m-k,x)}{R(m,x)} (k = 0, 1, 2, ..., n); \tag{5.119}$$

$$p_{n+r} = \frac{P(m-(n+r),x)}{R(m,x)} (r = 0, 1, 2, ..., m-n). \tag{5.120}$$

Среднее число простаивающих двигателей $\bar{l}$ рассчитаем по формуле

$$\bar{l} = \sum_{k=0}^{n} k p_k + \sum_{k=1}^{m-n} (n+r) p_{n+r} = m - x(1 - p_0), \tag{5.121}$$

а среднее число обслуживаемых ЭД $\bar{s}$ найдем из выражения

$$\begin{aligned} \bar{s} = \sum_{k=0}^{n} k p_k + n \sum_{r=1}^{m-n} p_{n+r} = \frac{1}{R(m,x)} \Bigg[\sum_{k=0}^{n} kP(m-r,x) + \\ + n \sum_{r=1}^{m-n} P(m-(n+r),x) = \frac{1}{R(m,x)} \{ m[R(m,x) - R(m-n-1,x)] - \\ - x[R(m-1,x) - R(m-n-2,x)] + nR(m-n-1,x] \}. \end{aligned} \tag{5.122}$$

Для ожидающего в очереди среднего числа электродвигателей $\bar{r}$ воспользуемся равенством $\bar{l} = \bar{s} + \bar{r}$, откуда

$$\bar{r} = \bar{l} - \bar{s}. \tag{5.123}$$

Вероятность того, что двигатель будет работать, определится по формуле

$$\xi = 1 - \frac{\bar{l}}{m} = \frac{x}{m}(1 - p_0). \tag{5.124}$$

Аналогично выражению (5.114) рассчитывается среднее время простоя

$$\bar{t}_n = \bar{t}_p \frac{1-\xi}{\xi} = \frac{1}{\lambda} \frac{1 - \frac{x}{m}(1-p_0)}{\frac{x}{m}(1-p_0)} = \frac{1}{n\mu} \frac{\bar{l}}{1-p_0}. \tag{5.125}$$

Так как плотность распределения времени ожидания в очереди

$$f_{оч}(t) = \delta(t) \sum_{k=0}^{n-1} p_k + \sum_{r=0}^{m-n-1} \frac{n\mu(n\mu t)^r}{r!} e^{-n\mu t} p_{n+r}, \tag{5.126}$$

среднее время ожидания ЭД в очереди $\bar{t}_{оч}$ будет

$$\begin{aligned} \bar{t}_{оч} &= \int_0^\infty t f_{оч}(t) dt = \sum_{r=0}^{m-n-1} p_{n+r} \int_0^\infty t \frac{n\mu(n\mu t)^r}{r!} e^{-n\mu t} dt = \\ &= \frac{1}{n\mu} \sum_{r=0}^{m-n-1} (r+1) p_{n+r} = \frac{1}{n\mu} \left[\sum_{r=0}^{m-n} r p_{n+r} - (m-n) p_m + \sum_{r=0}^{m-n-1} p_{n+r} \right] = \\ &= \frac{1}{n\mu} \left[\bar{r} - (m-n) p_m + \sum_{r=0}^{m-n} \frac{P(m-(n+r), x)}{R(m,x)} - p_m \right] = \\ &= \frac{1}{n\mu} \left[\bar{r} - (m-n-1) p_m + \frac{R(m-n, x)}{R(m,x)} \right], \end{aligned} \tag{5.127}$$

а среднее время обслуживания одного двигателя можно найти по выражению

$$\bar{t}_{обс} = \bar{t}_n - \bar{t}_{оч}. \tag{5.128}$$

Таким образом, в ходе проведенного исследования были определены основные показатели функционирования систем массового обслуживания электрических двигателей в сельском хозяйстве:

– относительные вероятности пребывания в исправном и неисправном состояниях электродвигателя, на который действуют два потока событий отказов и восстановлений с известными интенсивностями, позволяющие оценить целесообразность его использования;
– зависимость математического ожидания числа функционирующих в стационарном режиме двигателей от интенсивности выхода их из строя и восстановления;
– зависимости нахождения вышедшего из строя электродвигателя в очереди на ремонт при наличии и отсутствии ремонтной базы, что дает возможность оценить эффективность ее создания для каждого сельскохозяйственного предприятия.

Кроме того, результатом выполненного анализа замкнутых систем массового обслуживания электрических двигателей является то, что появилась возможность определять коэффициенты использования ремонтной базы, и, как следствие, оценивать рациональность содержания различного количества линий обслуживания.

5.3 Оптимизация параметров системы организации ремонта электрических двигателей в сельском хозяйстве

Как уже упоминалось ранее, каждое хозяйство самостоятельно выбирает наиболее приемлемый для него способ организации ремонта ЭД в зависимости от размера сельскохозяйственного предприятия и количества установленных на нем электродвигателей [2, 126, 179]:
– создание собственной ремонтной базы;
– ремонт электрических двигателей сторонней организацией.

Примем в качестве основного критерия решаемой задачи оптимизации затраты на эксплуатацию двигателей для различных способов организации их обслуживания. При этом затраты на реализацию первого способа организации ремонта складываются из следующих составляющих [132, 173]:
– затраты на строительство и ежегодное текущее обслуживание помещений для размещения пункта технического обслуживания и ремонта электродвигателей;
– затраты на приобретение и амортизацию ремонтного оборудования;
– затраты на оплату труда обслуживающего и ремонтного персонала;
– затраты на приобретение расходных материалов.

Первый способ организации обслуживания и ремонта, как видно, требует значительных капитальных вложений на начальном этапе и не подходит для большинства мелких хозяйств, вынужденных прибегать ко второму способу организации ремонта, который имеет особенности:
– большая длительность ремонта, обусловленная необходимостью доставки двигателей на специализированное ремонтное предприятие и обратно;

– невозможность полного контроля над технологическим процессом и, как следствие, возможное снижение показателей надежности отремонтированных ЭД;
– более высокая, чем при первом способе, стоимость ремонта двигателей [451].

На сегодняшний день, как показали исследования, данный способ организации ремонта ЭД нашел применение на более чем 90 % мелких и средних агропромышленных предприятиях и у более чем 30 % крупных сельхозпроизводителей [1, 2].

Определение количества линий обслуживания в случае применения первого способа организации ремонта двигателей осуществляется с учетом следующего:

– затраты на обслуживание помещений ремонтного пункта, амортизационные отчисления на установленное оборудование, заработная плата персонала являются постоянными величинами и практически не зависят от количества ремонтируемых ЭД;
– затраты на расходные материалы зависят от числа ремонтируемых в данный момент времени электрических двигателей и определяют количество линий обслуживания в течение расчетного периода.

Тогда суммарные затраты на ремонт ЭД и возмещение потерь от простоя оборудования при первом способе организации ремонта составят

$$З_{1\Sigma} = \sum_{i=1}^{k} S_{м,i} + A + З_{раб} + \sum_{i=1}^{k} У_{пр.i} \cdot t_{пр.i} + З_{обсл}\,, \qquad (5.129)$$

где k – количество вышедших из строя двигателей за период времени t; $S_м$ – стоимость материалов, расходуемых на ремонт одного электродвигателя; A – постоянные затраты на текущее содержание мастерской и амортизационные отчисления; $З_{раб}$ – заработная плата рабочих; $У_{пр.i}$ – убытки от простоя i-го ЭД в единицу времени; $t_{пр}$ – длительность простоя электродвигателей, состоящая из времени ожидания ремонта $t_{ож}$ и времени самого ремонта $t_{рем}$; $З_{обсл}$ – затраты на ежегодное техническое обслуживание.

В случае ремонта электрических двигателей сторонней организацией, суммарные затраты описываются зависимостью

$$З_{2\Sigma} = \sum_{i=1}^{k} S_{рем,i} + \sum_{i=1}^{k} У_{пр.i} \cdot t_{пр.i} + З_{тр}, \qquad (5.130)$$

где $S_{рем,i}$ – стоимость ремонта i-го двигателя; $З_{тр}$ – транспортные расходы.

Убытки от простоя оборудования имеют прямую зависимость от длительности ожидания ремонта, которая, в свою очередь, зависит от количества

линий обслуживания. Таким образом, появляется возможность в (5.129) и (5.130) выразить убытки от простоя через количество линий обслуживания.

Осуществим выбор функции цели и метода оптимизации параметров системы организации ремонта электродвигателей.

Тогда в качестве функций цели рассматриваемой задачи оптимизации целесообразно принять выражения (5.129) и (5.130), устремленные к минимуму [499]. Обозначим через S_p численное решение задачи математического программирования P, а через Arg(P) – множество решений задачи P, т. е. множество допустимых точек критериев множества R^n, для которых $S_p = G_{пн}$ или $S_p = G_{по}$.

В связи с тем, что целевые функции являются линейными, для решения данной задачи возможно использование метода линейного программирования [500].

Согласно теореме Минковского [501] относительно того, что выпуклый компакт в R^n является выпуклой оболочкой своих крайних точек, число крайних точек множества D, задаваемого в виде конечного числа линейных равенств и неравенств, является конечным, т. е. для решения поставленной задачи линейного программирования достаточно перебрать значения функций $G_{пн}$ и $G_{по}$ во всех крайних точках множества D. Как показала практика расчетов, нахождение всех крайних точек и перебор значений функций $G_{пн}$ и $G_{по}$ – довольно трудоемкая операция, поэтому вместо перебора был использован симплекс-метод, который для решения задач линейного программирования позволяет, начиная с некоторой исходной точки, переходить к другой по направлению наибольшего убывания искомых функций. Данный способ решения был реализован с помощью схемы синтеза оптимальной стратегии управления однородной марковской цепью с конечным числом состояний, предложенной Р. А. Ховардом [501]. Схема синтеза является итерационной процедурой, состоящей из двух шагов:

$$\begin{cases} g + v_i = q_i + \sum_{j=1}^{N} p_{ih} v_i \\ \min_{k \in K_i} \left\{ q_i^k + \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k v_i \right\} \end{cases} \quad i = \overline{1, N}, \; v_\sigma = 0, \tag{5.131}$$

где $g = \sum_{i=1}^{N} \pi_i q_i$ – средние потери (доход) за один шаг; π_i – стационарная вероятность нахождения системы в i-м состоянии; $q_i^k = \sum_{j=1}^{N} p_{ij}^k r_{ij}^k$; p_{ij}^k – вероятность шагового перехода из состояния i в состояние j при k-м управлении; K_i – множество возможных управлений в i-м состоянии; k_{ij}^k – соответствующие шаговые потери; N – число состояний марковской цепи (число электродви-

гателей); v_i – относительный вес для i-го исходного состояния; σ – базовое состояние цепи ($1 \le \sigma \le N$).

Она сходится при условии, что марковская цепь при любой стратегии управления является эргодической (все возвратные состояния являются сообщающимися, т. е. образуют один эргодический класс). При этом синтезируемая стратегия обеспечивает минимум величины g. Преимущество схемы Ховарда состоит в простоте процедуры оптимизации и отсутствии существенных ограничений на ее сходимость. Недостатком данной процедуры является трудоемкость процесса синтеза (особенно при большом числе состояний), что обусловлено необходимостью решения системы линейных алгебраических уравнений. Однако с учетом высокой степени развития современных вычислительных систем, данный недостаток не следует считать существенным.

Практическое использование метода линейного программирования предполагает, что для искомой функции должны быть определены начальная и конечная точки, между которыми находится экстремум данной функции [501]. Изменяемой величиной в зависимостях (5.129) и (5.130) является только длительность простоя ЭД, зависящая от числа линий обслуживания n. В таком случае, для решения задачи требуется выявить максимально и минимально возможное, с точки зрения длительности простоя оборудования, количество линий обслуживания [487, 502, 503].

Как правило, выход из строя электрического двигателя на сельскохозяйственном предприятии является причиной возникновения убытков, которые можно оценить следующим образом. Вероятность того, что отказавший двигатель будет ожидать ремонта больше некоторого времени t, согласно (5.32),

$$P\{\gamma > t\} = \prod e^{-(n(T)\beta-\lambda)t} \ (t \ge 0). \tag{5.132}$$

Тогда величина убытков в результате простоя технологического оборудования определится согласно формулам (5.129) и (5.130) для первого и второго способов организации ремонта соответственно.

Установим, что каждый работающий ЭД приносит некоторую прибыль $V_{раб.i}$, определяемую согласно [502]. При этом математическое ожидание количества работающих электродвигателей рассчитывается по (5.17). Тогда математическое ожидание объема прибыли в течение установленного периода времени найдем по выражению

$$M[V] = \sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} V_{раб.i} \cdot t_{раб.i}\ , \tag{5.133}$$

где $t_{раб.i}$ – время работы i-го двигателя в течение установленного периода.

С целью соблюдения условия безубыточности работы необходимо, чтобы прибыль была больше затрат $M[V] > З_{\Sigma}$ или, при первом способе организации ремонта,

$$\sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} V_{раб.i} \cdot t_{раб.i} > \sum_{i=1}^{k} S_{м,i} + A + З_{раб} + \sum_{i=1}^{k} У_{пр.i} \cdot (t_{ож} + t_{рем}) + З_{обсл}, \qquad (5.134)$$

откуда $t_{ож} < B_1 - t_{рем}$,

где
$$B_1 = \frac{\sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} V_{раб.i} \cdot t_{раб.i} - \sum_{i=1}^{k} S_{м,i} - A - З_{раб} - З_{обсл}}{(\sum_{i=1}^{k} У_{пр,i})}. \qquad (5.135)$$

При втором способе организации ремонта электродвигателей

$$\sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} V_{раб.i} \cdot t_{раб.i} > \sum_{i=1}^{k} S_{рем,i} + \sum_{i=1}^{k} У_{пр.i} \cdot (t_{ож} + t_{рем}) + З_{тр}, \qquad (5.136)$$

откуда $t_{ож} < B_2 - t_{рем}$,

где
$$B_2 = \frac{\sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} V_{раб.i} \cdot t_{раб.i} - \sum_{i=1}^{k} S_{рем,i} - З_{тр}}{(\sum_{i=1}^{k} У_{пр,i})}.$$

Вероятность того, что время ожидания $t_{ож}$ будет меньше расчетного времени t $P(t_{ож} < t) = 1 - \prod e^{-(n(T)\beta - \lambda)t}$, и, соответственно, для первого способа организации ремонта двигателей

$$P(t_{ож} < \frac{B_1}{(\sum_{i=1}^{n_в} У_{пр,i})} - t_{рем}) = 1 - \prod e^{-(n(T)\beta - \lambda)(B_1 - t_{рем})}. \qquad (5.137)$$

Условием безубыточной работы хозяйства является условие $t_{ож} < B_1 - t_{рем}$. Тогда вероятность безубыточной работы $P_{бу1}$ в заданных условиях для первого способа найдем по формуле [179, 503]

$$P_{бу1} = 1 - \prod e^{-(n(T)\beta - \lambda)B_1} . \quad (5.138)$$

Для второго способа организации ремонта $P_{бу2}$ найдем аналогичным образом

$$P_{бу2} = 1 - \prod e^{-(n(T)\beta - \lambda)B_2} . \quad (5.139)$$

Выполнив преобразование (5.138), выразим количество линий обслуживания электродвигателей через вероятность безубыточной работы для первого способа организации ремонта

$$n(T) = \frac{\ln\left(\dfrac{\prod}{1 - P_{бу1}}\right) + \lambda\beta}{\beta B_1} . \quad (5.140)$$

Аналогичный результат имеет место и для второго способа организации ремонта ЭД [456]. Найти точное значение вероятности безубыточной работы хозяйства, при котором количество линий обслуживания будет оптимальным, можно на основе сравнения затрат на их содержание и суммарных издержек на эксплуатацию всего парка электродвигателей с применением описанной выше схемы Ховарда [499]. Данный расчет в виду своей трудоемкости был осуществлен на ЭВМ.

Практическое использование разработанной методики оптимизации параметров системы организации ремонта электрических двигателей показано на примере системы массового обслуживания АКГУП «Центральный» (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Зависимость вероятности занятности всех линий обслуживания от их количества и интенсивности отказов электрических двигателей

Число линий обслуживания	Количество отказов электродвигателей, шт. / мес.									
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
5	0,55	0,63	0,72	0,81	0,90	1	1	1	1	1
6	0,29	0,34	0,39	0,45	0,52	0,59	0,66	0,74	0,82	0,91
7	0,06	0,08	0,09	0,12	0,14	0,17	0,20	0,23	0,27	0,31

Как видно из таблицы 5.1, при пяти линиях обслуживания СМО может быстро прийти к насыщению, т. к. увеличение числа отказавших двигателей с 20 до 25 и более увеличивает вероятность безубыточной работы с 0,55 до 1 и не позволяет системе обслуживать электрооборудование данного хозяйства. В этом случае, очередь ожидающих ремонта электрических двигателей будет постоянно расти.

Согласно разработанной методике оптимизации АКГУП «Центральный» рекомендовано перейти на 6 линий обслуживания, что хотя и увеличит ремонтные затраты на 20 %, однако снизит убытки от простоя оборудования на 37 %. Суммарная экономия составит 17 %. Дальнейшее увеличение количества линий обслуживания не приведет к росту экономичности работы хозяйства, т. к. уже при 7 линиях обслуживания выросшие до 40 % затраты на поддержание ремонтной базы сводят на нет экономический эффект от снижения убытков от простоя оборудования.

Таким образом, созданная методика оптимизации показателей процесса массового обслуживания [179] дала возможность с учетом наличия или отсутствия собственной ремонтной базы создавать для сельхозпредприятия оптимальный график вывода двигателей в ремонт, т. е. находить баланс между величиной затрат на их обслуживание и рентабельностью работы всего парка электрооборудования [451].

5.4 Прогнозирование технического состояния электрических двигателей, эксплуатирующихся в условиях агропромышленного комплекса

Как было показано выше, для построения оптимальных графиков диагностики и проведения восстановительных мероприятий необходимо, помимо прочего, достоверное определение значений времени безаварийной работы электрических двигателей, для чего используется коэффициент гармоник спектра напряженности ВМП ЭД, полученный по результатам лидерной эксплуатации специально подготовленных для этой цели образцов оборудования. Эксплуатация велась в нормальном режиме, но с более интенсивным нагружением для увеличения коэффициента эксплуатации.

Результаты измерений параметров спектра напряженности ВМП электродвигателей фиксировались в течение 5 лет на ряде зерновых и животноводческих хозяйств Алтайского края согласно методике, приведенной во втором разделе монографии. Результаты данного наблюдения на АКГУП «Центральный» Калманского района, АПК «Прибрежный» и АПК «Воздвиженский» Кулундинского района позволили выявить зависимость между параметрами спектра напряженности вешнего магнитного поля и остаточным ресурсом двигателя. По результатам наблюдений были построены таблицы (Приложение Г), дающие возможность прогнозировать остаточный ресурс ЭД для основных типов электрооборудования, используемых в сельском хозяйстве.

5.4.1 Разработка экспертной системы прогнозирования наработки до очередного диагностического контроля электродвигателей

Как известно, выход из строя электропривода ответственного механизма является серьезной проблемой, т. к. часто влечет за собой большой экономический ущерб. Кроме того, существует проблема планирования ремонтов, т. к. отказ двигателя носит не только случайный, но и во многом неопределенный характер. Поэтому для любого сельскохозяйственного предприятия важно знать время работы каждого ЭД [504].

В технике и медицине сейчас широко используются различные экспертные системы прогнозирования, а также разработано много различных методов для создания этих систем. В данной работе рассмотрена система прогнозирования, позволяющая оценить наработку до очередного диагностического контроля электрического двигателя. Входными параметрами будут: число пусков в сутки, характер нагрузки, режим работы двигателя, температура окружающей среды, влажность воздуха, наличие вредных примесей, качество электроэнергии, а также обобщенный параметр межвитковой изоляции [505]. Для создания такой экспертной системы прогнозирования применялся рассмотренный ранее информационно-логический анализ [184].

Известно, что экспертные системы – это прикладные системы, в которых база знаний представляет собой формализованные эмпирические знания высококвалифицированных специалистов (экспертов) в какой-либо узкой предметной области. При решении задач прогнозирования ЭС предназначены для замены экспертов по причине их недостаточного количества, недостаточной оперативности в решении задачи или в опасных (вредных) для них условиях.

В настоящее время можно выделить следующие основные классы задач, решаемых экспертными системами: диагностика; прогнозирование; идентификация; управление; проектирование; мониторинг. На рисунке 5.9 изображена обобщенная структура экспертной системы [2, 252].

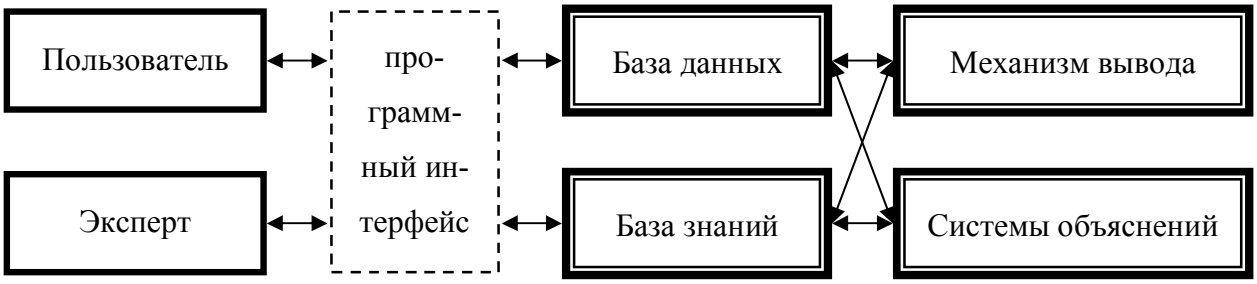


Рисунок 5.9 – Традиционная (упрощенная) структура экспертной системы

Входящая в структуру ЭС база знаний предназначена для хранения экспертных знаний о предметной области, используемых при решении задач экспертной системой. База данных предназначена для временного хранения фактов или гипотез, являющихся промежуточными решениями или результатом обще-

ния системы с внешней средой, в качестве которой выступает человек, ведущий диалог с системой.

В свою очередь, машина логического вывода – механизм рассуждений, оперирующий знаниями и данными с целью получения новых данных из знаний и других данных, имеющихся в рабочей памяти. Обычно для этого используется программно-реализованный механизм дедуктивного логического вывода (одна из его разновидностей) или механизм поиска решения в сети фреймов или семантической сети [506].

Машина логического вывода может реализовывать рассуждения в виде: дедуктивного вывода (прямого, обратного, смешанного); нечеткого вывода; вероятностного вывода; унификации; поиска решения с разбиением на последовательность подзадач; поиска решения с использованием стратегии разбиения пространства поиска с учетом уровней абстрагирования решения или понятий, с ними связанных; монотонного или немонотонного рассуждения; рассуждений с использованием механизма аргументации; ассоциативного поиска с использованием нейронных сетей; вывода с использованием механизма лингвистической переменной.

Предусмотренная в рассматриваемой структуре подсистема общения служит для ведения диалога с пользователем, в ходе которого ЭС запрашивает у него необходимые факты для процесса рассуждения, а также дает возможность пользователю контролировать и корректировать ход рассуждений экспертной системы. Подсистема объяснений необходима для того, чтобы дать возможность пользователю контролировать ход рассуждений и учиться у экспертной системы. Если нет этой подсистемы, экспертная система выглядит для пользователя как «вещь в себе», решениям которой можно либо верить, либо нет. Как правило, пользователь выбирает последнее, и такая ЭС не имеет перспектив для использования.

Подсистема приобретения знаний служит для корректировки и пополнения базы знаний. В простейшем случае – это интеллектуальный редактор базы знаний, а в более сложных экспертных системах – средство для извлечения знаний из баз данных, неструктурированного текста, графической информации и т. д.

Таким образом, структура рассмотренной системы позволяет оценить количественно факторы, негативно влияющие на наработку до очередного диагностического контроля ЭД [505]. При этом большую сложность вызывает ограниченное количество априорных данных, для устранения которой в системе должна быть реализована возможность самообучения. Данная возможность самообучения позволяет накапливать «опыт» (добавлять данные в априорную базу данных), автоматически анализировать данные при изменении базы априорных значений, и, как следствие, изменять рабочую гипотезу без вмешательства пользователя. Кроме того, для повышения достоверности прогнозирования в разработанную при непосредственном участии автора экспертную систему введен дополнительный критерий оценки $K_{ни}$ – коэффициент нелинейных искажений

$$K_{ни} = \frac{\sqrt{\sum_{i \geq 2} H_i^2}}{H_1}, \qquad (5.141)$$

где H_i – амплитуды гармоник спектра напряженности ВМП электродвигателя.

Введение данного критерия в созданной системе автоматизированной оценки результатов диагностики позволило исключить возможные ошибочные диагнозы, качественно повысило достоверность оценок и дало возможность определять такие часто встречающиеся случаи, как переувлажнение обмотки статора. Использование коэффициента нелинейных искажений значительно расширило применение описанного во втором разделе монографии метода диагностики, основанного на анализе гармонического состава спектра напряженности ВМП ЭД, в агропромышленном комплексе. Диапазон значений $K_{ни}$ приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Диапазон значений коэффициента нелинейных искажений

№ п/п	Значение критерия $K_{ни}$, о. е.	Номер ранга	Результаты диагностики
1	от 0 до 0,34	I	Дефекты отсутствуют
2	от 0,35 до 0,45	I	Дефекты отсутствуют, подозрение на переувлажнение изоляции
3	от 0,46 до 0,59	II	Незначительный уровень дефектности
4	от 0,6 до 0,65	III	Средний уровень дефектности, необходимо ТО
5	от 0,66 до 1	III, IV	Критический уровень дефектности, необходима срочная замена

5.4.2 Определение логических зависимостей параметров спектра напряженности внешнего магнитного поля электрического двигателя от степени развития различных дефектов

Для достоверного прогнозирования наработки до очередного диагностического контроля электродвигателей в разрабатываемую математическую модель, как указывалось, необходимо включить параметр, учитывающий текущее техническое состояние двигателя. Во втором разделе монографии доказана связь параметров спектра напряженности внешнего магнитного поля с функциональным состоянием обмоток статора при наличии в них различных дефек-

тов [253]. Отмечено, что достоверная оценка состояния обмоток ЭД, а также подшипникового узла в процессе эксплуатации стала возможной с использованием метода спектрального анализа ВМП. Применение данного метода позволяет количественно оценить частоты и амплитуды гармонических составляющих напряженности ВМП, отраженных в соответствующей зависимости.

Так, весь частотный диапазон распределения напряженности внешнего магнитного поля был нами разбит на четные и нечетные гармонические составляющие, каждая из которых отражает дефектность соответствующего узла двигателя: четные вызваны наличием эксцентриситета ротора, нечетные – дефектностью обмотки статора. При этом витковые замыкания значительно проявляют себя в диапазоне свыше 450 Гц, тогда как фазные замыкания – в диапазоне менее 450 Гц.

Заметим, что проявление ВМП электродвигателя может иметь сложную организацию во времени: в одних частотных диапазонах оно может быть стационарным процессом, в других – нестационарным. Названная выше классификация диапазонов справедлива для случая стационарности записи спектра напряженности внешнего магнитного поля во всех рассматриваемых частотных диапазонах. Если точной идентификации стационарности процесса ВМП ЭД в каком-либо рассматриваемом частотном диапазоне не проводится, то колебательная активность спектра в этом частотном диапазоне (выраженный пик) может иметь ошибочную физическую интерпретацию с последующими ложными выводами по результатам диагностики. Примером может служить переувлажнение электрического двигателя с одной парой полюсов. В спектре напряженности его ВМП явно проявляется гармоника 150 Гц, что свидетельствует об ухудшении междуфазной изоляции, хотя после сушки двигателя данный диагностический признак исчезает. Во избежание ошибочной интерпретации результатов диагностики автор предлагает применять непараметрические методы вычисления спектральной плотности мощности (СПМ) ВМП ЭД.

Распространенным классическим непараметрическим методом вычисления СПМ является метод Уэлча [325]. При этом методе рассчитывается, а затем усредняется набор спектров, полученных на последовательно смещенных во времени сегментах исходной зависимости ВМП. Зависимость СПМ сигнала, получаемая при этом, является статистической оценкой и характеризует зависимость распределения, в среднем, мощности исследуемого сигнала (напряженности ВМП ЭД) от частоты. Такой подход позволяет рассматривать анализируемую зависимость ВМП в качестве реализации некоторого случайного процесса (в исходном предположении стационарного, т. е., в среднем, однородного во времени). В данном случае амплитуда какого-либо пика зависимости СПМ не связана с постоянной амплитудой (или ее квадратом) гармоники с определенной частотой и отражающей некоторый постоянный ритм на этой частоте, а связана со средней мерой колебательной активности (мощностью) анализируемой зависимости изменения внешнего магнитного поля.

Дополнение методом информационно-логического анализа спектрального состава ВМП позволяет определять стационарность процесса изменения напряженности внешнего магнитного поля двигателя раздельно по частотным диапазонам, что уменьшает вероятность ошибочной диагностики (включение в рассмотрение нестационарных (случайных) компонентов, отраженных пиками на обычном спектре).

Помимо сказанного метод ИЛА предоставил возможность идентифицировать переходные процессы ВМП раздельно по частотным диапазонам, что, в свою очередь, дало возможность количественно оценивать реактивность различных флуктуаций нагрузки. Предложенный метод позволяет точно идентифицировать параметры низкочастотных колебаний стационарного (или нестационарного) характера и выделять механические дефекты ЭД от возможных проявлений условий окружающей среды.

По результатам применения информационно-логического анализа экспериментальных данных (Приложение Д) была получена зависимость текущего состояния двигателя от амплитуд ряда гармоник спектра напряженности его магнитного поля для случая с межвитковым замыканием

$$D = H_3 \vee (H_{11} \wedge H_5) \wedge H_7 \vee H_1 , \qquad (5.142)$$

где D – уровень дефектности электродвигателя; $\vee$ – дизъюнкция (логическое сложение); $\wedge$ – конъюнкция (логическое умножение).

В свою очередь, применение информационно-логического анализа для случая с межфазным замыканием позволило получить следующую зависимость

$$D = H_3 \wedge H_5 \vee (H_7 \wedge H_9) \vee H_1 . \qquad (5.143)$$

Использование найденных логических зависимостей и предложенного способа расчета весовых коэффициентов гармоник спектра напряженности ВМП ЭД дало возможность проводить точную оценку технического состояния электродвигателей, а также прогнозировать их остаточный ресурс [258].

Таким образом, применение полученных моделей и современных средств вычислительной техники обеспечило возможность изучения динамики процессов изменения спектра напряженности ВМП ЭД при развитии в нем дефектов. Разработанный метод диагностики электродвигателей на основе полученных связей между характером спектра напряженности ВМП и различными дефектами двигателя показал высокую эффективность при использовании в агропромышленном комплексе [507]. Практическая реализация алгоритма экспертной системы показана на рисунке 5.10.

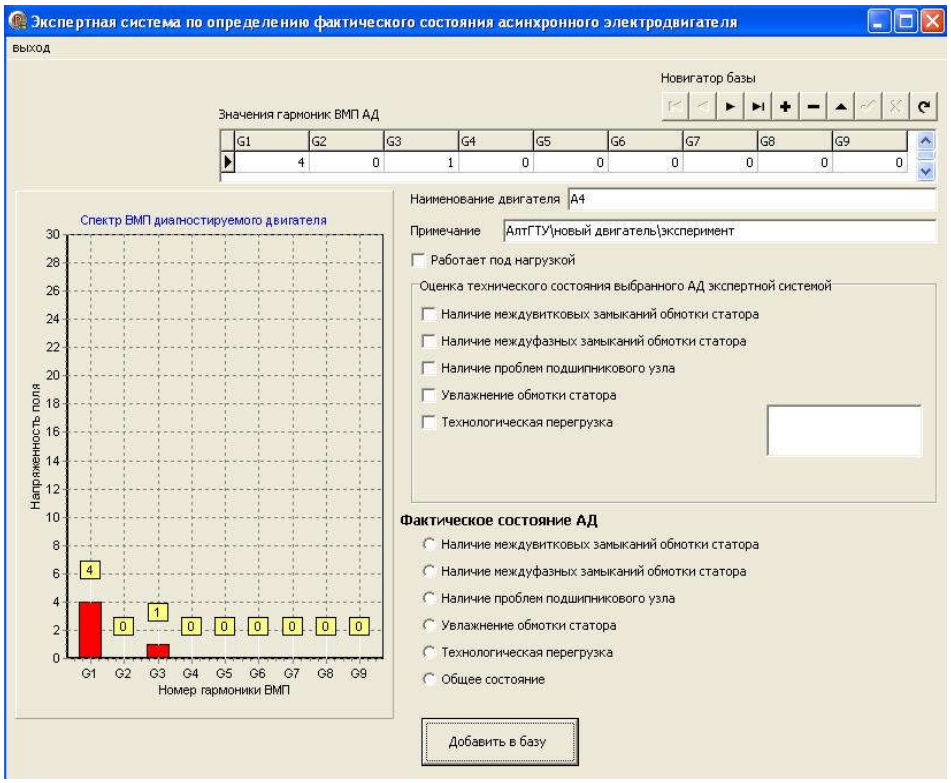


Рисунок 5.10 – Внешний вид программной оболочки, реализующей разработанный алгоритм экспертной системы

5.4.3 Количественная оценка наработки до очередного диагностического контроля двигателя с учетом влияния условий эксплуатации

Ранее уже было сказано, что увеличение срока службы электродвигателей во многом зависит от того, насколько правильно и эффективно будет решена задача по формированию стройной системы повышения надежности ЭД, охватывающей все стадии жизненного цикла двигателей от ввода в эксплуатацию до списания, а также по разработке специального комплекса мер, позволяющего проводить диагностику и контроль изоляции с целью установления реального состояния ЭД и прогнозирования дополнительной наработки до очередного диагностического контроля или проведения мероприятий по восстановлению изоляции обмоток. При этом было отмечено, что в рамках организационно-технического обеспечения ремонта после проведения операций по восстановлению электрической изоляции необходим диагностический контроль и прогнозирование изменения состояния изоляции статорных обмоток с целью назначения новой наработки до следующей диагностики [4, 58, 508].

Таким образом, одним из заключительных этапов на пути решения поставленной в работе задачи является прогнозирование наработки до очеред-

ного диагностического контроля электрического двигателя на основе оценки факторов, отрицательно влияющих на состояние его изоляции [509].

Основными этапами данного исследования являются [510]:

– создание базы априорных значений;
– выбор и обоснование методик обработки информации и количественной оценки степени влияния отрицательно воздействующих факторов на наработку до очередного контроля состояния ЭД;
– проведение эксперимента для проверки выдвинутой гипотезы.

В ходе реализации первого этапа решения рассматриваемой задачи была выявлена проблема, заключающаяся в полном отсутствии на сельскохозяйственных предприятиях учета аварий двигателей и анализа причин их возникновения. В большинстве случаев ведется лишь количественный учет вышедших из строя электродвигателей, зачастую без указания характера поломки. Вследствие этого, результаты выполненных исследований основывались на экспертной оценке специалистов данных предприятий. Тем не менее, была собрана информация с более чем 180 мест на различных сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края. При этом сбор данных шел по следующим параметрам: температура и влажность окружающей среды, наличие примесей в производственных помещениях, число пусков электродвигателей, режим работы, время работы в течение суток, а также время безотказной работы (в часах) ЭД.

Содержание второго этапа заключалось в проведении анализа полученной информации. Были рассмотрены три различных варианта метода исследования: дисперсионный, регрессионный и информационно-логический анализ, взвешены положительные и отрицательные стороны каждого. Наилучшие результаты показал информационно-логический анализ, что связано со следующими причинами:

– выборка данных, в силу специфики сельского хозяйства, не является представительной, т. к. ограниченное количество значений не дадут достоверного результата при использовании дисперсионного и регрессионного анализов;
– данные собирались с большой степенью разнообразия, что категорически противоречит применению регрессионных методов статистической оценки;
– информационно-логический анализ позволяет создать на своей базе самообучающуюся систему, а дальнейшее пополнение базы данных приведет к повышению точности результатов, но не их опровержению.

Опираясь на вышесказанное, было принято решение о применении информационно-логического анализа, и, в первую очередь, были количественно определены все факторы, влияющие на наработку до очередного диагностического контроля электрического двигателя [511]. Результаты расчета приведены в таблице 5.3 и на рисунках 5.11 – 5.13.

Таблица 5.3 – Результаты количественной оценки влияния различных факторов на наработку до очередного диагностического контроля электродвигателя

Наименование	Температура	Влажность	Число пусков	Время работы	Наличие примесей
$H(A)$	-2,08	-2,35	-2,31	-2,47	-1,24
$H(B)$	-2,76	-2,47	-2,63	-2,51	-2,6
$T(A,B)$	0,6	0,57	0,47	0,55	0,07
$K(A,B)$	0,216	0,232	0,177	0,208	0,025

В таблице 5.3 явление A – это наработка до контроля состояния ЭД, B – фактор, оказывающий влияние, $H(A)$ – неопределенность явления, $H(B)$ – неопределенность фактора, $T(A,B)$ – мера информации, передаваемой от фактора к явлению, $K(A,B)$ – коэффициент передачи информации. Подробная методика расчета изложена в [188].

Результаты проведенного исследования можно интерпретировать следующим образом. Из таблицы 5.3 видно, что отрицательно воздействующим фактором с сильнейшим влиянием на наработку до контроля состояния ЭД является влажность, тогда как наименьшее влияние оказывает наличие примесей в окружающей среде. При этом сбор данных проводился, в основном, на мехтоках и животноводческих комплексах.

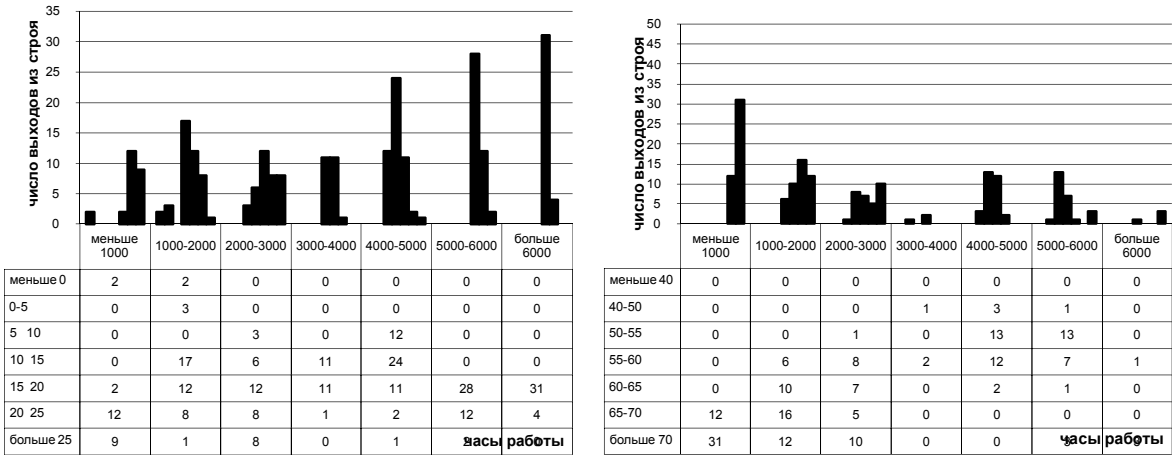


Рисунок 5.11 – Гистограммы зависимости наработки до отказа от различных температур и влажности окружающей среды

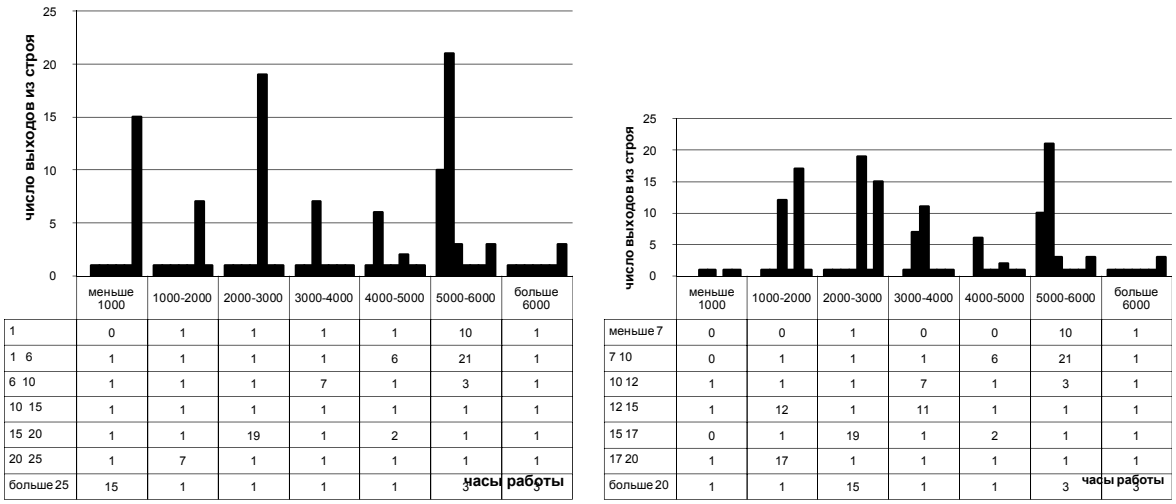


Рисунок 5.12 – Гистограммы зависимости наработки до отказа от числа пусков и времени работы электродвигателей

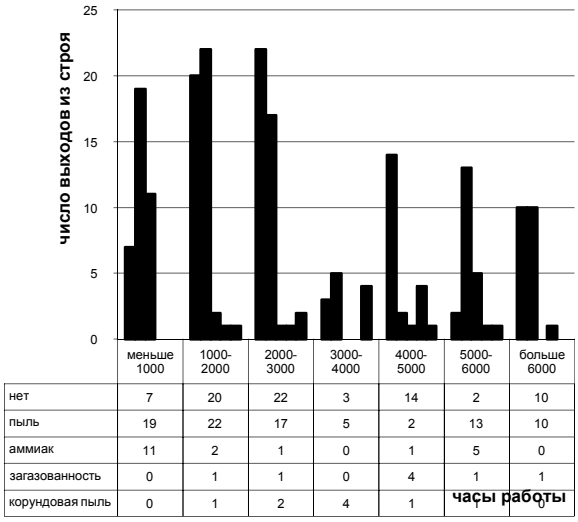


Рисунок 5.13 – Гистограмма зависимости наработки до отказа от примесей в окружающей среде

Следующим шагом исследования является прогнозирование наработки до очередного диагностического контроля двигателя. С этой целью была использована разработанная на базе информационно-логического анализа математическая модель, описывающая переход от нормального состояния работы ЭД к аварийному [505, 510].

Применение информационно-логического анализа, в данном случае, при малом количестве априорных данных дает более точные результаты по сравнению с регрессионными методами, которые трудно применять из-за большого множества сочетаний различных факторов, влияющих на наработ-

ку до очередного диагностического контроля двигателя. Кроме того, информационно-логический анализ позволяет оценить и неучтенные факторы, что делает прогноз более достоверным [325].

За входные параметры были приняты рассмотренные выше наблюдаемые, но не управляемые параметры окружающей среды (температура, влажность, наличие примесей), а также число пусков, режим и время работы ЭД. Следует заметить, что постановка эксперимента при использовании других ранее названных методов в данных условиях была бы невозможна или очень затруднительна. Выходным параметром была наработка до очередного диагностического контроля двигателя, а процесс перехода состояния электродвигателя от нормального к аварийному рассматривался как стохастический.

В процессе исследования была выдвинута рабочая гипотеза – предполагаемая логическая зависимость $T_{\text{диагн. } i}$ от факторов эксплуатации

$$T_{\text{диагн. } i} = D \vee v \wedge T \vee t_{раб} \wedge n \wedge q, \tag{5.144}$$

где v и T – влажность и температура окружающей среды соответственно; $t_{раб}$ – время работы; n – число пусков; q – наличие примесей в воздухе.

Математическая модель (5.144), описывающая переход от нормального состояния ЭД к аварийному, позволяет совершать прогнозирование его остаточного срока службы с точностью до 1000 часов при вероятности достоверности прогноза 85 – 90 %, что подтверждается результатами подконтрольной эксплуатации группы двигателей в ряде хозяйств Алтайского края. Непрерывное пополнение базы данных экспертной системы даст возможность уточнить коэффициенты «значимости» факторов, вид рабочей гипотезы, а также произвести более правдивый прогноз [506, 512].

Построенные математические модели явились завершающим и результирующим звеном в разработке системы информационно-программного сопровождения диагностики изоляции и прогнозирования наработки до очередного контроля состояния электрических двигателей в условиях сельского хозяйства (рисунок 5.14), позволившей объединить в себе количественную оценку влияния на состояние изоляции как параметров пропитки и сушки, так и воздействующих в процессе эксплуатации факторов [513, 514]. В результате был создан программный продукт, блок-схема функционирования которого изображена на рисунке 5.15 [14, 506, 515].

Раздел априорных данных, представленный на рисунке 5.15, является основой для определения степени влияния факторов эксплуатации. Сбор данных проводился на различных предприятиях аграрного комплекса Калманского, Первомайского, Алтайского и ряда других районов Алтайского края.

Рисунок 5.14 – Структура информационно-программного сопровождения диагностики ЭД и прогнозирования наработки до очередного контроля его состояния

Обоснованное ранжирование – разбиение всей совокупности данных на отдельные сегменты (ранги) – ключевой момент в определении точности и достоверности прогноза. Однако эти показатели имеют между собой обратную зависимость, т. е. увеличение точности прогноза неизменно приведет к снижению его достоверности. Поиск оптимального соотношения является отдельной проблемой, требующей разработки дополнительных алгоритмов, реализованных, например, при помощи нейросетей [508]. На сегодняшний день в рассматриваемой системе реализована возможность изменения рангов вручную на усмотрение пользователя.

Рисунок 5.15 – Блок-схема системы прогнозирования срока службы двигателя

Немаловажным разделом предлагаемой блок-схемы является анализ данных, предполагающий оценку факторов и определение рабочей гипотезы. Для оценки рабочей гипотезы необходима контрольная выборка (КВ), которая должна обладать необходимым разнообразием (быть представительной), а также эти данные не должны входить в априорную базу данных. Если результаты расчета при помощи рабочей гипотезы не опровергают данные КВ, то гипотеза утверждается. В противном случае необходимо произвести изменения рабочей гипотезы.

Рабочий блок позволяет осуществить прогноз наработки до очередной диагностики ЭД, а также моделирование различных процессов старения межвитковой изоляции в зависимости от применяемых методов повышения ее надежности [516].

Таким образом, разработанная система дает возможность оценить количественно факторы, негативно влияющие на наработку до очередного диагностического контроля ЭД, с высокой достоверностью (порядка 90 %) оценить результаты диагностики электродвигателя при выявлении в нем дефектов, адаптировать ее для конкретных производственных процессов с учетом основных воздействующих факторов, а также с вероятностью 85 – 90 % про-

гнозировать остаточный срок службы электрического двигателя на основе математической модели прогнозирования дополнительной наработки до очередного контроля его состояния. Большую сложность при этом вызывает ограниченное количество априорных данных, поэтому в системе реализована возможность самообучения. Возможность самообучения позволяет накапливать «опыт» (можно добавлять данные в априорную базу данных), автоматически анализировать данные при изменении базы априорных значений, и, как следствие, изменять рабочую гипотезу без вмешательства пользователя [507].

Данная система прогнозирования безаварийной работы ЭД позволяет [513]:

- производить гибкое планирование ремонтов электрических двигателей;
- сократить до минимума общее время аварийного простоя оборудования;
- осуществлять выбор более рациональных методов ремонта двигателей.

Реализация предложенной системы повышения надежности электродвигателей на основе использования комплексной диагностики совместно с электротермовакуумной технологией восстановления изоляции, а также методикой построения оптимальных планов обслуживания и ремонта ЭД дает возможность добиться:

- снижения издержек на эксплуатацию и ремонт электрических двигателей в условиях АПК с учетом дополнительных затрат на использование созданной системы повышения надежности ЭД на 20 – 25 %;
- повышения точности прогноза сроков проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту электродвигателей, эксплуатирующихся в сельском хозяйстве, на 10 – 15 %;
- увеличения показателей надежности ЭД на 80 – 90 % и сокращения до минимума общего времени их простоя в связи с выходом из строя.

Пример использования разработанной методики планирования сроков и качества технического обслуживания и ремонта по результатам диагностики изоляции электропривода сезонно используемого оборудования для различных объемов имеющихся финансовых средств представлен в зависимости от отрасли сельского хозяйства в таблицах 5.4 – 5.5. В данных таблицах отражены условия окружающей среды, в которых применяется электрооборудование, типы и назначение помещений, а также перечень оборудования, устанавливаемого в данных помещениях. Приведенный список электрических двигателей может быть расширен, т. к. в помещениях с указанными параметрами окружающей среды может быть установлено различное оборудование, состав которого зависит от конкретных условий. Кроме того, в вышеназван-

ных таблицах приводятся и другие параметры, такие как вид климатического исполнения электродвигателей, степень защиты оболочек, а также основные типы ЭД, которые рекомендуется использовать в тех или иных условиях эксплуатации. В качестве основного результата применения методики указаны периодичность технического обслуживания и текущих ремонтов электродвигателей для выбранных типов помещений. При этом следует отметить необходимость своевременного проведения мероприятий, направленных на обеспечение долгосрочного и безаварийного функционирования электропривода сезонно используемого оборудования, включающих в себя диагностику изоляции различными видами приборов. Данная необходимость, как указывалось ранее, обуславливается тем, что для различных типов оборудования в зависимости от места их установки и хранения нужно знать параметры изоляции для применения комплекса мер, которые могут позволить улучшить ее состояние. Кроме того, должны быть учтены важность и степень необходимости хозяйству того или иного электрооборудования в определенный момент времени, а также экономическая составляющая эффективности применения такого ЭО [517].

Рассмотрим, в частности, комплекс мероприятий, который необходимо произвести с электроприводом транспортера навозоудаления согласно разработанной методики. Из приведенных таблиц видно, что существует два типа такого оборудования – это эксплуатируемое в летний и, соответственно, зимний периоды. От этого зависит и тот комплекс мер, который будет применяться к данному типу оборудования, т. к. используемое в зимний период ЭО – летом остается на месте, а электрооборудование, эксплуатируемое в летний период, зимой демонтируется и перевозится на места хранения. Так, оборудование зимней эксплуатации необходимо диагностировать с помощью разработанных технических средств в начале октября. Это связано с тем, что в середине месяца начнется его интенсивная эксплуатация, а как показали проведенные исследования, наибольшее количество вышедшего из строя оборудования приходится на начальный период эксплуатации. Далее в период непосредственного применения необходимо проводить периодические замеры качества состояния изоляции, чтобы предвосхитить возможный выход из строя электрооборудования. В таких тяжелых условиях эксплуатации, как зима, диагностирование необходимо выполнять в середине декабря и февраля. Затем перед консервацией оборудования на летний период необходимо произвести контрольный замер состояния изоляции в начале мая. Перечисленные замеры состояния изоляции целесообразнее производить методом диагностики, основанном на анализе гармонического состава спектра напряженности внешнего магнитного поля двигателя, что позволяет снизить затраты времени и средств, одновременно обеспечивая достоверную картину состояния электрической изоляции.

Таблица 5.4 – Планирование обслуживания и ремонта электродвигателей, эксплуатируемых в растениеводстве

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	№ п/п	Перечень оборудования	Рекомендуемые параметры				Виды применяемых электродвигателей
				Вид климатического исполнения	Степень защиты оболочек	Периодичность, мес		
						технического обслуживания	текущих ремонтов	
В помещениях:								
сырых (влажность длительно превышает 75%)	Пункты послеуборочной обработки зерна	1	Агрегаты для приготовления травяной муки типа АВМ	У3, У2	IP 44	3	24	АО2, 4А, Д
		2	Зерносушилки			3	24	
пыльных (влажность до 98%, температура от -40 до +45 С, запыленность до 240 г/м.куб)	Мельницы, элеваторы, комбикормовые цеха, зерносклады	3	Транспортеры	У5	IP 44, IP 54	1,5	18	АО2, 4А, Д
		4	Нории			1,5	18	
		5	Вентиляторы			1,5	18	
		6	Зерноочистительные агрегаты			1,5	18	
		7	Зерносушилки			1,5	18	
		8	Зернодробилки			1	12	
На открытом воздухе или под навесом	Пункты послеуборочной обработки зерна	9	Разное оборудование и установки по обработке зерна	У2, У3	IP 44, IP 54	1	12	АО2, 4А, Д, АО2СХ
						1,5	24	

Таблица 5.5 – Планирование обслуживания и ремонта электрических двигателей, используемых сезонно в животноводстве

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	№ п/п	Перечень оборудования	Рекомендуемые параметры				Виды применяемых электродвигателей
				Вид климатического исполнения	Степень защиты оболочек	Периодичность, мес		
						технического обслуживания	текущих ремонтов	
В помещениях:								
особо сырых (влажность превышает 98%)	Кормоприготовительные цехи животноводческих ферм и комплексов	1	Дозаторы	У5	IP44, IP54	1,5	18	АО2, 4А, Д
		2	Смесители			1,5	18	
		3	Транспортеры			3	24	
		4	Измельчители кормов			1	12	
		5	Прессы			1,5	24	
	Доильные залы, молочные отделения	6	Молочные насосы	У5	IP44, IP54	1	9	АО2, 4А, Д, АО2СХ
		7	Сепараторы			1	9	
		8	Вакуум-насосы			1	9	
		9	Пастеризаторы			2	18	
	Насосные и моечные отделения молочных ферм	10	Насосы	У5	IP44, IP54	1,5	18	АО2, 4А, Д
		11	Вентиляторы			3	24	
особо сырых с химически активной средой (влажность 80...100%, содержание аммиака (мг/м.куб) от 2 до 140, сероводорода от 10 до 90, углекислого газа от 0,03 до 0,88	Животноводческие помещения	12	Транспортеры уборки навоза	У5	IP44	3	24	АО2СХ
		13	Насосы			3	24	
		14	Вентиляторы			3	24	

Простота и доступность параметров эксплуатации, отраженных в методике, позволяют ориентироваться в необходимости обслуживания и ремонта

того или иного типа электрооборудования, а также дают возможность проведения замеров состояния изоляции сезонно используемого ЭО лицам, не имеющим специального электротехнического образования, что является распространенным явлением на предприятиях сельскохозяйственной отрасли.

Математический аппарат теории массового обслуживания, опираясь на данные об объеме и сроках выделения ремонтных средств, позволяет с требуемой точностью предсказать количество находящихся в исправном состоянии электродвигателей и длительности ожидания ремонта вышедших из строя ЭД, что позволит в полном объеме оценить затраты будущих периодов на ремонт электрооборудования. В свою очередь, найденные зависимости показателей качества и видов ремонта электрооборудования дают подробную картину взаимосвязи методик ремонта, качества используемых материалов и эксплуатационных показателей электродвигателей на протяжении всего периода их использования. При этом был проведен подробный анализ всех видов остаточных повреждений ЭД, а также определены способы диагностики и прогнозирования их развития.

Для удобного проведения рассматриваемых расчетов разработано соответствующее программное обеспечение. Учитывая все большую распространенность компьютерной техники на предприятиях агропромышленного комплекса, можно утверждать, что большинство хозяйств Алтайского края смогут использовать данную разработку. С помощью созданного программного обеспечения проводится анализ затрат на эксплуатацию электродвигателей. При этом исходными данными являются таблицы прогнозируемого остаточного ресурса и убытков от простоя для каждого ЭД сельхозпредприятия.

Данные значения вводятся в программу в виде текстового файла с расширением txt, который находится в одном каталоге с исполняемым модулем. Структура файла следующая. Первым числом в файле является зарплата одного электромеханика, руб./мес. Далее находятся три колонки цифр. Первая колонка соответствует порядковому номеру электродвигателя, вторая – прогнозируемому остаточному ресурсу в часах, третья – убыткам от простоя, руб./день. Например:

```
2700
1  1200  56
2  6500  420
3  1900  240
4  3400  600
5  2500  310
6  4200  280
```

После запуска исполняемого модуля формируется файл результатов, содержащий следующие значения (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Результаты использования разработанного программного обеспечения для анализа затрат на эксплуатацию электродвигателей

№ строки	Данные
1	Оптимальное количество линий обслуживания для каждого месяца, шт.
2	Среднее время ожидания ремонта электродвигателем, дней
3	Данные об убытках от простоя ЭД для каждого месяца, руб.
4	Коэффициент загрузки ремонтного оборудования, о. е.
5	Среднее количество электродвигателей, находящихся в очереди, шт.

Программа автоматически определяет приоритетность в обслуживании электродвигателей. В случае обнаружения подобных ЭД, формируется файл *prior.txt*, в который входит три столбца цифр. Первый столбец соответствует номеру двигателя, второй – длительности его простоя, третий – убыткам от простоя.

Таким образом, созданное программное обеспечение, являющееся составной частью разработанного информационно-программного сопровождения диагностики ЭД и прогнозирования наработки до очередного контроля его состояния, позволяет планировать необходимое, наиболее рациональное с точки зрения простоя и затрат на содержание, количество линий обслуживания и определять требуемый для этой цели объем финансовых средств.

5.5 Основные результаты и выводы по разделу

1 Создание и эффективное применение методики планирования обслуживания и ремонта электродвигателей в современной экономической ситуации возможно на основе комплексного анализа данных об их текущем состоянии, интенсивностях отказов во времени и производительности ремонтной базы при использовании математического аппарата теории массового обслуживания.

2 Найденные математические выражения для отыскания основных параметров функционирования СМО электродвигателей в сельском хозяйстве, в т. ч. относительных вероятностей пребывания единичного двигателя в исправном и неисправном состоянии, позволяют оценить рентабельность его использования. Кроме того, определена зависимость математического ожидания

количества работающих ЭД от интенсивности выхода их из строя и восстановления; выявлены зависимости нахождения отказавшего электродвигателя в очереди на ремонт при наличии и отсутствии ремонтной базы, дающие возможность оценить эффективность ее создания для каждого предприятия АПК; определены коэффициенты использования ремонтной базы, позволяющие отыскать целесообразное количество линий обслуживания.

3 Разработанная математическая модель системы организации ремонта электродвигателей позволяет находить зависимости между показателями эксплуатации парка двигателей на предприятиях АПК, интенсивностями их отказов и объемом предусмотренных на ТОиР денежных средств. Полученная функция затрат на ремонт ЭД в зависимости от параметров рассмотренных систем массового обслуживания предопределила использование метода линейного программирования для нахождения оптимального распределения денежных средств.

4 Предложенная методика оптимизации показателей функционирования системы массового обслуживания дает возможность с учетом наличия или отсутствия у сельскохозяйственного предприятия собственной ремонтной базы создавать оптимальный график вывода электродвигателей в ремонт с точки зрения снижения суммарных затрат на проведение восстановительных мероприятий и убытков от простоя оборудования, т. е. находить баланс между величиной затрат на ТОиР ЭД и рентабельностью работы всего парка электрических двигателей. Данная методика позволяет с учетом специфики и сезонности работы двигателей на предприятиях АПК разрабатывать рекомендации по объему и срокам выполнения мероприятий по восстановлению работоспособности ЭД и обеспечивает снижение затрат на их эксплуатацию и ремонт в 1,2 – 1,3 раза.

5 Найденный способ расчета весовых коэффициентов гармоник спектра напряженности ВМП ЭД обеспечивает определение гипотезы и построение логических зависимостей изменения характера внешнего магнитного поля при развитии различных дефектов в электрическом двигателе, что дает возможность проводить точную оценку технического состояния электродвигателей, а также прогнозировать их остаточный ресурс в агропромышленном комплексе.

6 Одним из наиболее простых и доступных, но в то же время эффективных способов прогнозирования остаточного срока службы двигателя является подход, основанный на отыскании логической зависимости, позволяющей дать количественную оценку степени влияния на наработку до очередной диагностики факторов, воздействующих на электродвигатель в процессе эксплуатации, а также параметров пропитки и сушки изоляции ЭД как одного из важнейших этапов ремонта. Доказано, что отрицательно воздействующим фактором с высоким влиянием на наработку до очередной диагностики ЭД является влажность (коэффициент влияния 0,232), значительно

меньшее влияние оказывает наличие примесей в окружающей среде (коэффициент влияния 0,025).

7 Разработанная экспертная система прогнозирования срока службы электрических двигателей на основе математической модели прогнозирования дополнительной наработки до очередной диагностики ЭД позволяет с высокой достоверностью (порядка 90 %) интерпретировать результаты диагностики электродвигателя при выявлении в нем дефектов, с вероятностью 85 – 90 % оценить остаточный срок службы двигателя при дестабилизирующем воздействии внешних факторов, а также адаптировать ее для конкретных производственных процессов с учетом основных воздействующих факторов. В результате расчета было установлено, что использование данной системы обеспечивает сокращение издержек, связанных с выходом электродвигателя из строя, в 1,5 – 1,8 раза.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Итогом выполненной работы стало развитие теоретических и научно-технических основ построения системы повышения надежности электродвигателей, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях сельского хозяйства. Работа носит завершенный характер и содержит нижеследующие решения представленных в монографии задач комплексного научного исследования.

1 Построены математические модели процессов старения и восстановления изоляции электродвигателя на основе информационно-логического анализа экспериментальных данных, обеспечивающие объективную оценку степени влияния воздействующих факторов на состояние изоляции в реальных условиях эксплуатации и ремонта. Доказано, что отрицательно воздействующим фактором с высоким влиянием на наработку до очередной диагностики ЭД является влажность (коэффициент влияния 0,232), значительно меньшее влияние оказывает наличие примесей в окружающей среде (коэффициент влияния 0,025).

2 Получены теоретические и экспериментальные зависимости, положенные в основу комплексной диагностики: на этапе эксплуатации предложен метод, построенный на использовании изменения спектра напряженности ВМП двигателя в зависимости от степени развития различных дефектов, а на этапе ремонта – метод, построенный на использовании соответствующего изменения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке. Применение разработанных критериев комплексной диагностики позволило повысить достоверность оценок состояния ЭД до уровня 80 – 90 % вместе с простотой схемных решений и удобством в эксплуатации созданных технических средств, внедрение которых обеспечивает срок окупаемости, равный 1 – 1,5 года.

3 Построены математические модели с использованием системного подхода к исследованию процессов переноса теплоты и массы под действием сил различной природы в капиллярно-пористом теле обмотки, описывающие процессы разрушения и восстановления изоляции двигателя, а также устанавливающие взаимосвязь между наиболее значимыми параметрами пропитки и сушки обмоток и значениями предложенного показателя качества ремонта ЭД. В основу полученных закономерностей легли выявленные принципы ускорения указанных процессов при интенсивном изменении давления в специализированных вакуумных установках, а выполненные эксперименты подтвердили гипотезу о зависимости обобщенного диагностического параметра от режимов скоростной вакуумной пропитки и сушки изоляции.

4 Разработана эффективная электротехнология единого комплекса скоростного вакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции обмоток ЭД, основанная на результатах решения задачи количественной оценки степени влияния различных факторов на процессы восстановления

изоляции электродвигателя. Предложена методика оптимизации методов и параметров ремонта двигателей в условиях сельскохозяйственных предприятий, позволившая рассчитать режимы электротермовакуумной технологии, обеспечивающие требуемое качество изоляции при сокращении температуры сушки на 15 – 20 °С, общей длительности процесса до 1,5 – 2 ч по замкнутому циклу без каких-либо транспортировочных операций, а также выработать рекомендации, повышающие срок службы изоляции в 1,7 – 2,2 раза и сокращающие ежегодный ущерб, наносимый сельскохозяйственному производителю, в 1,3 – 1,8 раза.

5 Построена аналитическая зависимость, устанавливающая связь между количеством и типом ремонтов, средствами, затраченными на них выполнение, и показателями надежности отремонтированного ЭД, позволяющая избежать дополнительных затрат на необоснованные и неэффективные способы восстановления его работоспособности. Разработана с использованием теории массового обслуживания методика оптимизации сроков и объемов восстановительных мероприятий с учетом требований, предъявляемых к качеству изделий, срокам протекания указанного процесса, стоимости конечного продукта, а также специфики работы электродвигателей на предприятиях АПК. Внедрение разработанной методики обеспечивает снижение затрат на эксплуатацию и ремонт ЭД в 1,2 – 1,3 раза.

6 Создана система прогнозирования остаточного срока службы электродвигателя на основе разработанных многофакторных математических моделей прогноза наработки до очередного контроля его состояния с точностью до 1000 часов и вероятностью точности прогноза 85 – 90 %, позволяющая определять рациональные графики проведения профилактических мероприятий и ремонтов, а также сократить издержки, связанные с выходом двигателя из строя, в 1,5 – 1,8 раза. Разработан информационно-программный комплекс средств измерения и прогноза, обеспечивающий сбор, хранение и учет информации о техническом состоянии объектов, причинах отказов; обработку накопленного объема информации с последующим определением динамики изменения состояния ЭД, а также принятием решения о сроках проведения очередной диагностики, технического обслуживания или ремонта, их объемах и видах.

7 Реализация предложенной системы повышения надежности электродвигателей на основе использования комплексной диагностики совместно с электротермовакуумной технологией восстановления изоляции, а также методикой построения оптимальных планов обслуживания и ремонта ЭД позволяет добиться:

– снижения издержек на эксплуатацию и ремонт электрических двигателей в условиях АПК с учетом дополнительных затрат на использование созданной системы повышения надежности ЭД на 20 – 25 %;

– повышения точности прогноза сроков проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту электродвигателей, эксплуатирующихся в сельском хозяйстве, на 10 – 15 %;

– увеличения показателей надежности ЭД на 80 – 90 % и сокращения до минимума общего времени их простоя в связи с выходом из строя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 **Хомутов, С. О.** Электротермовакуумная пропитка и сушка электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов. – Новосибирск : Наука, 2006. – 325 с.

2 **Хомутов, С. О.** Ситуационное планирование ремонтов электродвигателей на основе их электромагнитной диагностики [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков, В. Г. Тонких. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – 230 с.

3 **Горнов, А. О.** Расширение разрешающей способности устройств защиты и диагностики асинхронных двигателей [Текст] / А. О. Горнов, А. В. Киселев // Электротехника. – 1990. – № 11. – С. 18-20.

4 **Исследование** надежности электрооборудования и разработка энергосберегающих, экологически чистых технологий его восстановления [Текст] : отчет о НИР (заключ.) / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова ; рук. Хомутов О. И. – Барнаул, 1999. – 221 с. – Исполн.: Хомутов О. И., Сташко В. И., Хомутов С. О., Гутов И. А., Порошенко А. Г., Штраухман О. А., Чагин В. А.– № ГР 01970000744. – Инв. № 02.9.90 001280.

5 **Дергач, В. И.** Повышение надежности электродвигателей сельскохозяйственного производства при капитальном ремонте [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / В. И. Дергач. – Челябинск, 1988. – 211 с.

6 **Гутов, И. А.** Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции [Текст] : дис. … канд. техн. наук: 05.20.02. – Защищена 26.12.97 / И. А. Гутов. – Барнаул, 1997. – 259 с.

7 **Грундулис, А. О.** Фазочувствительная защита электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] : дис. … д-ра техн. наук / А. О. Грундулис. – Елгава, 1984. – 337 с.

8 **Русан, В. И.** Состояние и основные направления совершенствования эксплуатации электроприводов, применяемых в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В. И. Русан, В. А. Моисейчик, Л. С. Рузов // Индустриализация работ при монтаже, техническом обслуживании и ремонте машин и оборудования животноводческих ферм: науч. тр. – Минск : ВНИИТИМЖ, 1987. – С. 10-19.

9 **Хомутов, О. И.** Система технических средств и мероприятий повышения эксплуатационной надежности изоляции электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / О. И. Хомутов. – Челябинск, 1990. – 450 с.

10 **Пястолов, А. А.** Факторы, влияющие на надежность работы электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] / А. А. Пястолов, А. А. Большаков, Г. А. Петров // Автоматизированный привод в народном хозяйстве: сб. тр. – М. : Энергия, 1971. – Т. 4. – С. 194-195.

11 **Михаил, С. А.** Аварийные режимы работы асинхронных двигателей 0,4 кВ [Текст] / С. А. Михаил // Электротехника. – 2005. – № 2. – С. 32-35.

12 **Абдулзаде, С. В.** Исследование в целях диагностики физических процессов функционирования электрических машин при неисправностях в обмотке статора и ротора [Текст] / С. В. Абдулзаде, М. А. Гашимов // Электротехника. – 2004. – № 2. – С. 20-27.

13 **Хомутов, С. О.** Электротехнологическая система повышения надежности электродвигателей, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственного производства [Текст] / С. О. Хомутов // Вестник КрасГАУ. – 2009. – №3. – С. 173-178.

14 **Кобозев, Е. В.** Экспертная система прогнозирования состояния электрических двигателей на основе использования результатов их диагностики в условиях сельского хозяйства [Текст] : дис. … канд. техн. наук: 05.20.02 / Е. В. Кобозев. – Барнаул, 2009. – 132 с.

15 **Хомутов, С. О.** Эксплуатация и ремонт электродвигателей с использованием электротермовакуумной технологии пропитки и сушки : учеб. пособие [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов, О. И. Хомутов, В. И. Сташко, Г. В. Суханкин, Н. Т. Герцен. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – 458 с.

16 **Системные** проблемы и Стратегия развития агропродовольственного комплекса России в среднесрочной перспективе [Электронный ресурс] // Труды Международной промышленной академии : сб. науч. тр. – М., 2005. – Вып. 2. – Режим доступа : http://www.mcx.ru/news/news/show/2749.195.htm.

17 **Анализ** причин повреждения электродвигателей в США [Текст] // Промышленная энергетика. – 1970. – № 1. – С. 8-10.

18 **Аграрный** сектор США в начале XXI века [Текст] : Сборник трудов сектора аграрных проблем США и Канады ИСКРАН / Под ред. Б. А. Чернякова. 2 т. – М. : Типография Россельхозакадемии, 2008. – ISBN 978-5-85941-258-7.

19 **Воробьев, А. А.** Старение твердых диэлектриков и надежность электрической изоляции [Текст] / А. А. Воробьев и др. // Электрофизические проблемы применения твердых и комбинированных диэлектриков в технике высоких напряжений : Сб. науч. тр. – Новосибирск : Наука, 1974.

20 **Вершинин, Ю. Н.** Электрический пробой твердых диэлектриков [Текст] / Ю. Н. Вершинин. – Новосибирск : Наука, 1968.

21 **Койков, С. Н.** Электрическое старение твердых диэлектриков [Текст] / С. Н. Койков, А. Н. Цикин. – Л. : Энергия, 1968.

22 **Кучинский, Г. С.** Разрушение и проблемы надежности изоляции высоковольтных импульсных конденсаторов при длительном воздействии высоких электрических колебаний [Текст] / Г. С. Кучинский и др. // Тез. докл. IV секц. науч. совета АН СССР. – Томск, 1975.

23 **Александров, Н. В.** Электроизоляционные материалы и системы изоляции высоковольтных двигателей и генераторов [Текст] / Н. В. Александров, В. Г. Огоньков, С. Г. Трубачев // Материалы Всемирн. электротехн. конгресса. – М., 1977.

24 **Варденбург, А. К.** Новые материалы для пропитки обмоток и напыленной изоляции [Текст] / А. К. Варденбург // Исследование, совершенствование конструкций и технологии производства низковольтных асинхронных

двигателей новых серий : Тез. докл. Всесоюзн. конф. – М. : Информэлектро, 1975.

25 **Кулаковский, Б. В.** Выявление дефектов в изоляции электрических машин дефектоскопами [Текст] / Б. В. Кулаковский // Электрические станции. – 1965. – № 5. – С. 17-19.

26 **Хазановский, П. М.** Надежность изоляции электрических машин [Текст] / П. М. Хазановский, А. И. Галушко, И. С. Максимова, Р. Г. Оснач. – М. : Энергия, 1979. – 176 с.

27 **Хвальковский, А. В.** Вопросы надежности изоляции статорных обмоток генераторов [Текст] / А. В. Хвальковский. – М. – Л. : Энергия, 1966. – 240 с.

28 **Баженова, Т. Ю.** Исследование ионизационного старения высоковольтной изоляции электрических машин [Текст] : дис. … канд. техн. наук / Т. Ю. Баженова. – Л., 1968. – 200 с.

29 **Баев, В. А.** Экспериментальные исследования емкостной характеристики изоляции низковольтных асинхронных электродвигателей [Текст] / В. А. Баев, Н. П. Захаров // Вестник электропромышленности. – 1957. – № 1.

30 **Иерусалимов, М. Е.** Исследование методов неразрушающих испытаний изоляции электрических машин и трансформаторов [Текст] : дис. … докт. техн. наук / М. Е. Иерусалимов. – Киев, 1968. – 261 с.

31 **Козырев, Н. А.** Изоляция электрических машин и методы ее испытаний [Текст] / Н. А. Козырев. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.

32 **Бернштейн, Л. М.** Изоляция электрических машин общего назначения [Текст] / Л. М. Бернштейн. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 376 с.

33 **Барэмбо, К. Н.** Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин [Текст] / К. Н. Барэмбо, Л. М. Бернштейн. – М.: Энергия, 1967. – 303 с.

34 **Маслов, В. В.** Влагостойкость электрической изоляции [Текст] / В. В. Маслов. – М. : Энергия, 1978. – 208 с.

35 **Гольдберг, О. Д.** Испытания электрических машин [Текст] : учеб. для вузов по электромех. и электроэнерг. спец. / О. Д. Гольдберг. – 2-е изд., испр. – М. : Высш. шк., 2000. – 256 с.

36 **Каганов, З. Г.** Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы [Текст] / З. Г. Каганов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.

37 **Разработка** основ проектирования и технологии производства систем изоляции низковольтных обмоток электрооборудования [Текст] : отчет о НИР (заключит.) / Томский политехн. ун-т; рук. Ю. П. Похолков. – №ГР 01960008019. – Инв. № 02990003905. – Томск, 1999. – 58 с.

38 **Гольдберг, О. Д.** Надежность электрических машин [Текст] : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская ; под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.

39 **Муравлев, О. П.** Входной контроль эмалевой изоляции провода при изготовлении всыпных обмоток асинхронных двигателей [Текст] / О. П. Му-

равлев, А. Д. Немцев, Э. К. Стрельбицкий // Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы. – Вып. 7 (24) - 8 (25). – 1972. – С. 17-19.

40 **Гольдберг, О. Д.** Качество и надежность асинхронных двигателей [Текст] / О. Д. Гольдберг. – М. : Энергия, 1968. – 176 с.

41 **Похолков, Ю. П.** Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей [Текст] : дис. … докт. техн. наук / Ю. П. Похолков. – Томск, 1977. – 403 с.

42 **Исследование** процессов деградации и теоретические основы моделирования состояния полимерных электроизоляционных систем [Текст] : отчет о НИР (заключ.) / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова ; рук. Хомутов О. И. – Барнаул, 2000. – 194 с. – Исполн.: Хомутов О. И., Сташко В. И., Хомутов С. О., Гутов И. А., Порошенко А. Г., Штраухман О. А., Чагин В. А. – № ГР 01970000744. – Инв. № 02.20.00 03181.

43 **Системный** анализ и моделирование процессов старения и деградации изоляции электрооборудования [Текст] : отчет о НИР (заключит.) / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова ; рук. Хомутов О. И. – Барнаул, 2004. – 258 с. – Исполн.: Хомутов О. И., Сташко В. И., Хомутов С. О., Гутов И. А., Грибанов А. А. и др. – № ГР 01990008306. - Инв. № 02.2004.02763.

44 **Хомутов, О. И.** Оценка свойств диэлектрических материалов в процессе их эксплуатации [Текст] / О. И. Хомутов, А. В. Левачев // Известия вузов. Сер. Физика. – 2000. – №11. – С. 259-263.

45 **Курбатова, Г. С.** Электродвигатели для сельского хозяйства [Текст] / Г. С. Курбатова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 64 с.

46 **Усов, В. В.** Повышение эффективности использования асинхронных двигателей серии 4А в сельскохозяйственном производстве за счет применения лобовых охладителей [Текст] : дис. … канд. техн. наук / В. В. Усов. – Челябинск, 1981. – 145 с.

47 **Хомутов, О. И.** Система технических средств и мероприятий по повышению надежности электрооборудования [Текст] / О. И. Хомутов. – Барнаул, 1990. – 98 с.

48 **Дергач, В. И.** Электродвигатели, применяемые в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В. И. Дергач // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1981. – Вып. 169. – С. 21-26.

49 **Исследование** электродвигателей. Проведение хозяйственных и контрольных испытаний электродвигателей серии 4А [Текст] : отчет о НИР 86-82 / ЧИМЭСХ ; рук. А. А. Пястолов. – № ГР 02830043044. – Челябинск, 1982. – 78 с.

50 **Копылов, Ю. В.** Исследование нагрева и тепловых параметров асинхронных двигателей малой мощности в продолжительном и повторно-кратковременном режимах [Текст] : дис. … канд. техн. наук / Ю. В. Копылов. – Томск, 1974. – 180 с.

51 **Муравлев, О. П.** Разработка теории и практических методов управления качеством электрических машин [Текст] / О. П. Муравлев // Электричество. – 1986. – № 4.

52 **Гольдберг, О. Д.** Теоретическая и экспериментальная разработка методов расчета показателей надежности, ускоренных испытаний и контроля качества асинхронных двигателей [Текст] : дис. … докт. техн. наук / О. Д. Гольдберг. – М., 1971. – 292 с.

53 **Тищенко, Н. А.** К вопросу о надежности электрических двигателей [Текст] / Н. А. Тищенко // Электричество. – 1964. – № 11.

54 **Хмелевский, В. С.** О надежности электродвигателей [Текст] / В. С. Хмелевский // Электричество. – 1964. – № 11.

55 **Гольдберг, О. Д.** Определение надежности конструкций изоляции электрических машин при номинальных значениях эксплуатационных факторов [Текст] / О. Д. Гольдберг, П. М. Хазановский // Электротехника. – 1967. – № 7.

56 **Гольдберг, О. Д.** Расчет надежности межвитковой изоляции электрических машин с всыпной обмоткой [Текст] / О. Д. Гольдберг, П. М. Хазановский // Электротехника. – 1967. – № 1. – С. 25-28.

57 **Хомутов, О. И.** Информационное обеспечение системы эксплуатационной надежности электрооборудования [Текст] / О. И. Хомутов, И. А. Гутов, С. О. Хомутов // Наука, практика, образование: тр. Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова. Вып. 7. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1997. – С. 145-148.

58 **Хомутов, С. О.** Эксплуатация, диагностика и ремонт изоляции электрических машин [Текст] : учеб. пособие для студентов вузов / О. И. Хомутов, В. И. Сташко, С. О. Хомутов. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. – 146 с.

59 **Левачев, А. В.** Информационно-программное сопровождение системы обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателей [Текст] / А. В. Левачев // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Тезисы докладов второй всероссийской научно-технической конференции. Ч. 1. – Нижний Новгород, 2000. – С. 15.

60 **Сырых, Н. Н.** Техническое обслуживание электрооборудования в сельском хозяйстве [Текст] / Н. Н. Сырых, В. С. Чекрыгин, С. А. Калмыков. – М. : Россельхозиздат, 1980. – 223 с.

61 **Машевский, В. П.** Исследование влияния режимов работы и условий окружающей среды животноводческих помещений на состояние электроприводов и обоснование нового способа сохранения их работоспособности [Текст] : дис. … канд. техн. наук / В. П. Машевский. – Киев, 1979. – 222 с.

62 **Гудкин, А. Ф.** Микроклимат свиноводческих помещений и пути его улучшения [Текст] / А. Ф. Гудкин. – Благовещенск : Благовещ. СХИ, 1973. – 28 с.

63 **Сырых, Н. Н.** Повышение надежности электрифицированных технологических процессов [Текст] / Н. Н. Сырых // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 8. – С. 46–50.

64 **Гутов, И. А.** Ускоренные лабораторные испытания по старению изоляции электродвигателей [Текст] / И. А. Гутов, О. И. Хомутов // Научно-техническое творчество студентов: сб. тез. докл. 55-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава Алтайского гос. техн. ун-та. Ч. 2 / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1997. – С. 129-136.

65 **Мартыненко, И. И.** Влияние режимов работы на эксплуатационную надежность электродвигателей [Текст] / И. И. Мартыненко, Н. А. Корчемный, В. П. Машевский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – №9. – С. 29-31.

66 **Артемян, Г. Л.** Исследование влияния эксплуатационных факторов на виброактивность двигателей малой мощности [Текст] / Г. Л. Артемян // Электротехника. – 1993. – № 2. – С. 42.

67 **Медведев, А. А.** Виды повреждений и причины отказов электродвигателей сельскохозяйственных электроприводов [Текст] / А. А. Медведев, Н. Е. Кабдин // Применение электроэнергии и эксплуатация устройств сельского электроснабжения / Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства. – М. : Знание, 1992. – 312 с.

68 **Хомутов, О. И.** Перспективные направления развития современных вакуумных безотходных технологий восстановления работоспособности электрических машин на стадии технического обслуживания и ремонта [Текст] / О. И. Хомутов, А. А. Сошников, С. О. Хомутов // Передовые технологии на пороге XXI века: сб. тез. докл. / Междунар. конф., посвященная 145-летию со дня рождения В. Г. Шухова, М., 5–9 окт. 1998 г. – Ч. 1. – М. : Науч.-изд. центр «Инженер», 1998. – С. 326-328.

69 **Будзко, И. А.** Оценка экономического эффекта в задачах по сельскому электроснабжению с неопределенными исходными данными [Текст] / И. А. Будзко, М. С. Левин, Г. Л. Эбина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – №1. – С. 50-53.

70 **Левин, М. С.** Методы теории решений в задачах оптимизации систем электроснабжения [Текст] : Учеб. пособие / М. С. Левин, Т. Б. Лещинская / Под ред. И. А. Будзко. – М. : ВИПКэнерго, 1989. – 130 с.

71 **Андрианов, В. Н.** Регулируемые асинхронные электродвигатели в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В. Н. Андрианов и др. ; под ред. Д. Н. Быстрицкого. – М. : Энергия, 1975. – 399 с.

72 **Мусин, А. М.** Повысить надежность электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] / А. М. Мусин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – № 9. – С. 1-3.

73 **Прищеп, Л. Г.** Проблемы энергетики села [Текст] / Л. Г. Прищеп, Е. И. Базаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986. – № 10. – С. 7-9.

74 **Пястолов, А. А.** Новый этап сельской электрификации [Текст] / А. А. Пястолов, Г. П. Ерошенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 11. – С. 10-12.

75 **Саплин, Л. А.** Исследование влияния системы изоляции на работоспособность электродвигателей мелиоративных насосных станций [Текст] : дис. … канд. техн. наук / Л. А. Саплин. – Челябинск, 1977. – 215 с.

76 **Немировский, А. Е.** Исследование и повышение влагостойкости изоляции электродвигателей в животноводческих помещениях [Текст] : дис. … канд. техн. наук / А. Е. Немировский. – Челябинск, 1977. – 226 с.

77 **Будзко, И. А.** Электроснабжение сельского хозяйства [Текст] : учеб. для вузов по спец. «Электрификация и автоматизация сел. хоз-ва» / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – М. : Агропромиздат, 1990. – 495 с.

78 **Назаров, Г. И.** Теплостойкие пластмассы [Текст] : Справочник / Г. И. Назаров, В. В. Сушкин. – М. : Машиностроение, 1980. – 208 с.

79 **Лещинская, Т. Б.** Алгоритм решения многокритериальных задач оптимизации с неопределенной информацией на примере выбора оптимальной мощности глубокого ввода высокого напряжения [Текст] / Т. Б. Лещинская, А. А. Глазунов, А. Г. Шведов // Электричество. – 2004. – № 10. – С. 8-14.

80 **Судник, Ю. А.** Автоматизация технологических процессов [Текст] : учеб. для вузов по спец. «Электрификация и автоматизация с.-х. пр-ва» / Ю. А. Судник, И. Ф. Бородин. – М. : Колос, 2005. – 344 с.

81 **Худоногов, А. М.** Пути повышения функциональной надежности электровоза [Текст] / А. М. Худоногов, Ш. К. Исмаилов, В. П. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2006. – № 4. – С. 28-34.

82 **Сошников, А. А.** Защита от аварийных режимов в электроустановках 0,38 кВ [Текст] / А. А.Сошников, И. В. Белицын ; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – 47 с.

83 **Никольский, О. К.** Оценка уровня электробезопасности на объекте при защите системой зануления [Текст] / О. К. Никольский, В. С. Германенко, О. Н. Дробязко // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4. – Ч. 3. – С. 268-275.

84 **Буторин, В. А.** Прогнозирование ресурса подшипниковых узлов электродвигателей по результатам стендовых испытаний (на примере их работы в условиях животноводческих ферм) [Текст] : дис. … канд. техн. наук / В. А. Буторин. – Челябинск, 1980. – 196 с.

85 **Ерошенко, Г. П.** Повышение эффективности эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве [Текст] : дис. … докт. техн. наук / Г. П. Ерошенко. – Саратов, 1983. – 306 с.

86 **Ильин, Ю. П.** Результаты обследования состояния эксплуатации электродвигателей в совхозе Еманжелинский Челябинской области [Текст] / Ю. П. Ильин // Науч. тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1978. – Вып. 143. – С. 7-9.

87 **Ильин, Ю. П.** Исследование влияния вибрации на надежность обмоток электродвигателя [Текст] / Ю. П. Ильин, Н. К. Катаева // Обеспечение безопасности жизнедеятельности в условиях современных предприятий: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. / Челябинский гос. техн. ун-т. – Челябинск, 1993. – С. 29-30.

88 **Хомутов, О. И.** Устройство автоматического контроля состояния изоляции электродвигателей [Текст] / О. И. Хомутов, А. В. Левачев, В. И. Сташко // Молодежь – науке будущего: Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции. – Набережные Челны : Изд-во Камского политехн. ин-та, 2000. – С. 116.

89 **Стеценко, А. А**. Системы мониторинга и диагностики машин : сб. науч. тр. [Текст] / А. А. Стеценко, О. И. Бедрий, О. А. Стеценко. – Сума : НТЦ «Диагностика, 2004. – С. 21-34.

90 **Сташко, В. И.** Диагностика изоляции электродвигателей в сельском хозяйстве на основе использования метода затухающих колебаний в обмотке [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02. / В. И. Сташко. – Защищена 24.03.98 / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 1998. – 134 л.: ил. + Прил. (20 л.)

91 **Мозгалевский, А. В.** Техническая диагностика: Непрерывные объекты [Текст] : учеб. пособие для втузов / А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров. – М. : Высш. шк., 1975. – 207 с.

92 **Пархоменко, П. П.** Основы технической диагностики [Текст] / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

93 **Волохов, С. А.** Проявление статического эксцентриситета ротора во внешнем магнитном поле электрических машин [Текст] / С. А. Волохов, П. Н. Добродеев // Электротехника. – 2002. – № 11.

94 **Макаров, Р. А.** Средства технической диагностики машин [Текст] / Р. А. Макаров. – М. : Машиностроение, 1981. – 223 с.

95 **Таран, В. П.** Диагностика электрооборудования [Текст] / В. П. Таран. – Киев : Техника, 1983. – 200 с.

96 **Биргер, И. А.** Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.

97 **Коныгин, Н. В.** Стандартизация в области вибрации, контроля технического состояния, диагностики и прогнозирования ресурса промышленных машин [Электронный ресурс] / Н. В. Коныгин, А. А. Стеценко, О. А. Стеценко (НТЦ «Диагностика», г. Сумы). – Режим доступа : http://www.vibration.ru/standart.shtml. – Загл. с экрана.

98 **Лыков, А. В.** О системах диффузионных уравнений тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах [Текст] / А. В. Лыков // ИФЖ. – М. : Химия, 1974. – Т. 16. – № 1.

99 **Куц, П. С.** Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции [Текст] / П. С. Куц, И. Ф. Пикус. – Минск : Наука и техника, 1979. – 296 с.

100 **Куц, П. С.** Процессы сушки капиллярно-пористых материалов [Текст] / П. С. Куц. – М. : Химия, 1990. – 310 с.

101 **Бернштейн, Л. М.** Пропитка обмоток на вакуум-пропиточной установке АВБ-1. Технология электротехнического производства [Текст] / Л. М. Бернштейн. – М. : Высш. шк., 1981. – Вып. 7. – 24 с.

102 **Калитвянский, В. И.** Изоляция электрических машин [Текст] / В. И. Калитвянский. – М. – Л. : [б. и.], 1949.

103 **Холодовская, Р. С.** Электроизоляционные пропиточные составы на основе эпоксидных смол, применяемые зарубежными фирмами [Текст] / Н. В. Александров, Р. С. Холодовская, Л. С. Збарская. – М. : [б. и.], 1970. – 70 с.

104 **Хинчин, А. Я.** Математические задачи теории массового обслуживания [Текст] / А. Я. Хинчин. – М. : Высш. шк., 2003. – 286 с.

105 **Коваленко, И. Н.** Теория массового обслуживания применительно к задачам производств [Текст] / И. Н. Коваленко. – М. : Высш. шк., 1995. – 245 с.

106 **Гнеденко, Б. В.** Введение в теорию массового обслуживания [Текст] / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – М. : Высш. шк., 1966. – 425 с.

107 **Хомутов, С. О.** Вопросы экономики в области эксплуатации электродвигателей на предприятиях агропромышленного комплекса России и стран СНГ [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2006. – № 3-1. – С. 214-220.

108 **Хомутов, С. О.** Системный анализ проблемы поддержания эксплуатационной надежности электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский альманах. – 2001. – №4. – С. 57-61.

109 **Тонких, В. Г.** Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля [Текст] : дис. … канд. техн. наук : 05.20.02 / В. Г. Тонких. – Барнаул, 2009. – 181 с.

110 **Хомутов, О. И.** Исследование эксплуатационной надежности электродвигателей в условиях комплексов крупного рогатого скота [Текст] : дис. … канд. техн. наук / О. И. Хомутов. – Челябинск, 1977. – 192 с.

111 **Хомутов, С. О.** Технология конструкционных электротехнических материалов [Текст] : учеб. пособие: в 2 кн. Кн. 1 / С. О. Хомутов, С. В. Горелов, Р. В. Манчук, А. С. Попов, В. И. Сташко. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2005. – 384 с.

112 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе [Текст] : дис. … канд. техн. наук / С. О. Хомутов. – Барнаул, 1999. – 228 с.

113 **Пястолов, А. А.** Научные основы эксплуатации электросилового оборудования [Текст] / А. А. Пястолов. – М.: Колос, 1968. – 224 с.

114 **Воронин, С. М.** Исследование процесса износа изоляции электродвигателей животноводческих объектов и разработка способа прогнозирования ее технического состояния [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / С. М. Воронин. – Зерноград, 1982. – 129 с.

115 **Разгильдеев, Г. И.** Методика исследований вибрации обмоток асинхронных двигателей и оценка вибрационного износа изоляции [Текст] / Г. И. Разгильдеев, Б. А. Федосенко // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара. – М., 1979. – С. 191-193.

116 **Артемян, Г. Л.** Вибрационная надежность асинхронных двигателей малой мощности [Текст] / Г. Л. Артемян // Электротехника. – 1990. – № 8. – С. 19-23.

117 **Волкович, В. Л.** Модели и методы оптимизации надежности сложных систем [Текст] / В. Л. Волкович, А. Ф. Волошин, В. А. Заславский, И. А. Ушаков. – Киев : Наукова думка, 1993.

118 **Барзилович, Е. Ю.** Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы [Текст] / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов. – М. : Советское радио, 1975.

119 **Хомутов, О. И.** Оценка надежности электродвигателей в условиях эксплуатации [Текст] / О. И. Хомутов, А. В. Левачев, А. А. Грибанов // Современные техника и технологии : тр. седьмой Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т. 1. – Томск : Изд-во ТПУ, 2001. – С. 43-45.

120 **Сырых, Н. Н.** Эксплуатация электрооборудования в сельскохозяйственном производстве [Текст] / Н. Н. Сырых. – М. : ВНИИТЭИСХ, 1981. – 68 с.

121 **Граматович, Э. К.** Исследование влияния режимов работы электродвигателей животноводческих ферм на срок их службы [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Э. К. Граматович. – Челябинск, 1975. – 31 с.

122 **Хомутов, С. О.** Надежность электродвигателей при воздействии на их изоляцию тепловых и механических нагрузок [Текст] / С. О. Хомутов, М. А. Панасенко // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : Сборник трудов Международной научно-технической конференции. В 3-х ч. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2009. – Ч. 2. – С. 232-234.

123 **Кабдин, Н. Е.** Повышение эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей в сельскохозяйственном производстве [Текст] : дис. … канд. техн. наук / Н. Е. Кабдин. – М., 2002. – 239.

124 **Мусин, А. М.** Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты [Текст] / А. М. Мусин. – М. : Колос, 1979. – 112 с.

125 **Надежность** и эффективность в технике [Текст] : Справочник. В 10 т. Т. 9. Техническая диагностика / Под общ. ред. В.В. Клюева, П.П. Пархоменко. – М. : Машиностроение, 1987. – 352 с.

126 **Антонов, М. В.** Эксплуатация и ремонт электрических машин [Текст] : учеб. пособие для спец. «Электромеханика» вузов / М. В. Антонов, Н. А. Акимова, Н. Ф. Котеленец. – М. : Высш. шк., 1989. – 192 с.: ил.

127 **Хомутов, С. О.** Изоляция и перенапряжения в системах электроснабжения [Текст] : учеб. пособие : в 2 частях. Ч. 1. / С. О. Хомутов, С. В. Горелов, Л. Н. Татьянченко. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. –116 с.

128 **Хоменко, О. В.** Прогнозирование остаточного ресурса изоляции электродвигателей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве [Текст] : дис. … канд. техн. наук / О. В. Хоменко. – Челябинск : ЧИМЭСХ, 1988. – 145 с.

129 **Грундулис, А. О.** Защита электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] / А. О. Грундулис. – М. : Агропромиздат, 1988. – 140 с.

130 **Соркинд, М.** Универсальная защита для асинхронного электродвигателя: миф или реальность? [Электронный ресурс] / М. Соркинд. – Режим доступа : http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/fvti/kleshnin/library/s1.htm. – Загл. с экрана.

131 **Вакуленко, К. Н.** О вибрации лобовых частей всыпных обмоток при ускоренных испытаниях асинхронных обдуваемых двигателей с короткозамкнутым ротором [Текст] / К. Н. Вакуленко, В. Д. Главный, И. П. Лукьянов, Ю. А. Прокофьев // Электротехника. – 1973. – № 8. – С.25-27.

132 **Афанасьев, Н. А.** Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий [Текст] / Н. А. Афанасьев, М. А. Юсипов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

133 **Соркинд, М.** Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы [Электронный ресурс] / М. Соркинд // Новости электротехники. – 2005. – № 2 (32). – Режим доступа : http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php. – Загл. с экрана.

134 **Хомутов, С. О.** Мониторинг и прогнозирование параметров электрических нагрузок сельских сетей в реальных условиях эксплуатации [Текст] / С. О. Хомутов, Е. А. Акиньшин, А. Н. Попов. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – 9 с.

135 **Хомутов, С. О.** Совершенствование системы обеспечения эксплуатационной надежности электрических машин [Текст] / С. О. Хомутов // Челябинскому государственному агроинженерному университету – 70 лет : Тезисы докладов на XL научно-технической конференции. – Челябинск, 2001. – С. 250-251.

136 **Гроздов, А. Г.** Гидролитическая деструкция связующего при восстановлении электрических машин [Текст] / А. Г. Гроздов, А. А. Рахманов, А. А. Дьячев, А. В. Зезюлинский // Электротехника. – 1990. – №12. – С. 56-58.

137 **Edward Charls.** Cheap motor rewinds cond hundreds of millions [Текст] / Charls Edward // Electrical Review. – 1985. – №2. – P. 6.

138 **А. с. 672705 СССР.** Способ удаления изоляции с узлов электрических машин при ремонте [Текст] / В. Л. Симкин, В. С. Дягилев, Е. И. Воганова // Открытия. Изобретения, 1981. – №7.

139 **Антонов, М. В.** Ремонт низковольтных электрических машин [Текст] : Учеб. пособие для проф. обучения рабочих на пр-ве / М. В. Антонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 160 с.

140 **Осьмаков, А. А.** Технология и оборудование производства электрических машин [Текст] : Учебник / А. А. Осьмаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1980. – 312 с.

141 **Копылов, И. П.** Справочник по электрическим машинам [Текст] / И. П. Копылов, Б. К. Клоков. – М. : Высш. шк., 1985. – 207 с.

142 **Технология** производства асинхронных двигателей [Текст] / Под ред. В. Г. Костромина. – М. : Энергоиздат, 1981. – 270 с.

143 **Elaherty, R. J.** Comparison of the effect of varnish treatment processes on the moisture resistance of electrical insulation systems for random won and motors [Текст] / R. J. Elaherty, J. A. Kimball, J. E. Tobin // Proc. 11 Elec. Insul. Conf., 1973. – N.Y., 1973. – P. 126-130.

144 **Соболев, В. В.** Интенсификация процесса пропитки электрической изоляции наложением электрического поля [Текст] / В. В. Соболев, Л. Г. Кустанович, Э. В. Кущ, Н. С. Гусейнова // Изв. вузов. – 1987. – С. 7-10.

145 **Хомутов, С. О.** Дифференциация методов обслуживания и ремонта электрических двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. В. Держинский // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 58-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – 157 с.

146 **Клоков, Б. К.** Обмотчик электрических машин [Текст] / Б. К. Клоков. – М. : Высш. шк., 1987. – 256 с.

147 **Варденбург, А. К.** Пропитка обмоток электрических машин в условиях крупносерийного производства. Технология электротехнического производства [Текст] / А. К. Варденбург, Л. А. Зайцева. – М. : Высш. шк., 1970. – 230 с.

148 **Антонов, М. В.** Технология производства электрических машин [Текст] : Учеб. пособие для вузов по спец. «Электр. машины» / М. В. Антонов, Л. С. Герасимова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 511 с.

149 **Осин, И. Л.** Устройство и производство электрических машин малой мощности [Текст] : Учеб. пособие для сред. ПТУ / И. Л. Осин, М. В. Антонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 214 с.

150 **Механизация** пропиточных работ [Текст]. – М. : Информэлектро, 1986. – 180 с.

151 **Keichel, W.** Vakuumimprägnieranglage mit Regelungseinrichtung [Текст] / W. Keichel // Elec. – Pract. – 1975. – Bd 29, № 6. – S. 204-205.

152 **Vakuum – Imprägnier – und Trocknungsanlage** [Текст] // Elec. – 1982. – Bd 36, № 2. – S. 108.

153 **Vakuumimprägnieranglage** für elektrische Wicklangen [Текст] // Ind. – Ans., 1978. – Bd 100, № 49. – S. 26.

154 **Markovit, M.** General Electric's third generation VPI resin [Текст] / Markovitz M., Gottung W. H. et al. // Proc. 17 Elec. / Electron. Insul. Conf., Boston, Mass., Sept. 30 – Oct. 3, 1985. – N.Y., 1985. – P. 110-114.

155 **Preuss, E.** Jetzt auch für Isolierstoffklassen Fund H: Backlackverfahren für Wicklungen [Текст] / E. Preuss // Elek. Masch. – 1977. – Bd 56, № 2. – S. 31-34.

156 **Miller, G. H.** Considering VPI consider the alternatives [Текст] / G. H. Miller // Proc. 15 Elec. / Electron. Insul. Conf., Chicago, Oct. 19–22, 1981. – N.Y., 1981. – P. 16-17.

157 **Anderson, S. A.** New generation of epoxy impregnates for high voltage applications [Текст] / S. A. Anderson // Proc. 15 Elec. / Electron. Insul. Conf., Chicago, Oct. 19–22, 1981. – N.Y., 1981. – P. 69-71.

158 **Хомутов, О. И.** Совершенствование технологии ремонта электрических машин [Текст] / О. И. Хомутов. – М. : Росагропромиздат, 1990. – 63 с.

159 **Хомутов, О. И.** Интенсификация физико-химических процессов при изготовлении и ремонте электротехнических изделий [Текст] / О. И. Хомутов, В. П. Голицын, Я. К. Абрамов, Н. М. Глушакова // Химизация народного хозяйства – важное условие ускорения научно-технического прогресса : Тез. докл. науч.-техн. конф. – Барнаул, 1987. – С. 50-52.

160 **Хомутов, О. И.** Перспективы развития научных исследований в области импульсно-вакуумной технологии [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов // Вузовская наука на международном рынке научно-технической продукции : Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1995. – С. 58-59.

161 **Хомутов, О. И.** Перспективные направления развития современных энергосберегающих технологий ремонта электрических машин [Текст] / О. И. Хомутов, А. А. Сошников, С. О. Хомутов // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. – Благовещенск: Изд-во ЗАО «Амурская правда», 1998. – С. 117-121.

162 **Хомутов, С. О.** Пути дальнейшего развития системы организационно-технических мероприятий обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателей [Текст] Ч. 3. / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4. – С. 223-229.

163 **Хомутов, С. О.** Анализ влияния внешних воздействующих факторов на состояние изоляции электродвигателей [Текст]. Ч. 3. / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4. – С. 260-267.

164 **Хомутов, С. О.** Автоматизированная система обеспечения надежности работы электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов, И. А. Гутов // Сборник научных трудов кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 33-40.

165 **Синягин, Н. Н.** Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики [Текст] / Н. Н. Синягин, Н. А. Афанасьев, С. А. Новиков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.: ил.

166 **Барзилович, Е. Ю.** Модели технического обслуживания сложных систем [Текст] / Е. Ю. Барзилович. – М. : Высшая школа, 1982.

167 **Барзилович, Е. Ю.** Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем [Текст] / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов. – М. : Советское радио, 1971.

168 **Хомутов, О. И.** Диагностика изоляции электродвигателей в условиях эксплуатации [Текст] : учеб. пособие / О. И. Хомутов. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1993. – 120 с.

169 **Хомутов, С. О.** Методы диагностики изоляции электрических машин [Текст] : учеб. пособие / В. И. Сташко, Г. В. Суханкин, С. О. Хомутов, Н. Т. Герцен. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – 204 с.

170 **Хомутов, С. О.** Технологические энергосберегающие системы повышения надежности потребителей электрической энергии [Текст] / С. О. Хомутов, О. И. Хомутов // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008) : Труды второй научно-практической конференции с международным участием. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008.

171 **Мишутин, В. С.** Система технического обслуживания и ремонта оборудования: мифы и реальность [Электронный ресурс] / В. С. Мишутин. – Режим доступа: http://www.pacc.ru/analytics/restructuring/toro3.html. – Загл. с экрана.

172 **Официальный сайт** ООО «Технетика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kudrin.org. – Загл. с экрана.

173 **Рекомендации** по технической диагностике и прогнозированию остаточного ресурса электродвигателей сельскохозяйственных объектов [Текст]. – Зерноград : ВНИПТИМЭСХ, 1981. – 44 с.

174 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности использования асинхронных двигателей в агропромышленном комплексе [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Вестник Челябинского государственного агроинженерного университета. – 2000. – Т. 31. – С. 70-74.

175 **Панасенко, М. А.** Организация технического обслуживания асинхронных двигателей на основе их диагностики [Электронный ресурс] / М. А. Панасенко, В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Горизонты образования; вып. 9 – Барнаул, 2007. – Режим доступа:
http://edu.secna.ru/main/review/2007/n9/nim2007/epp.pdf – Загл. с экрана.

176 **Система** планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий [Текст] / Госагропром СССР. – М. : ВО Агропромиздат, 1987. – 191 с.

177 **Khomutov, S. O.** Research of influence of construction design parameter values of the asynchronous engines on the result of diagnostics of their insulation condition [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2002. – № 2. – С. 89-96.

178 **Хомутов, С. О.** Повышение экономической эффективности планово-предупредительного ремонта электрооборудования в сельском хозяйстве [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2-2. – С. 270-279.

179 **Хомутов, С. О.** Совершенствование системы планово-предупредительного ремонта электродвигателей с использованием методов теории массового обслуживания [Текст] / С. О. Хомутов // Социальные, информационные и энергетические проблемы региона : Вестник Томского государственного университета : Общенаучный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. – Томск : ТГУ, 2006. – № 82. – С. 39-42.

180 **Данилов, В. Н.** О защите электродвигателей от аварийных режимов [Текст] / В. Н. Данилов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – №7. – С. 48-50.

181 **Хомутов, С. О.** Современные перспективные методы и установки восстановления изоляции электрических машин [Текст] / С. О. Хомутов // Изоляция – 99 : Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – С.-Пб. : Изд-во «Нестор», 1999. – С. 109-110.

182 **Хомутов, С. О.** Современные технологии восстановления городского и промышленного электрооборудования [Текст] / С. О. Хомутов // Молодежь – Барнаулу : Сборник тезисов первой городской межвузовской научно-практической конференции студентов и аспирантов. – Барнаул, 1999. – С. 86-89.

183 **Математическое моделирование** и вычислительный эксперимент – новое направление в научных исследованиях. Основные этапы решения прикладных задач с помощью ЭВМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.referat.su/refs_new/7382/ref_part_0.shtml. – Загл. с экрана.

184 **Хомутов, С. О.** Управление дефектообразованием в асинхронном двигателе путем использования информационно-логического анализа [Текст] / С. О. Хомутов // Интеллектуальные технологии в образовании, экономике и управлении – 2006 : Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. – Воронеж : Воронежская областная типография – изд-во им. Е.А. Болховитинова, 2006. – С. 306-308.

185 **Чернов, И. В.** Энтропийные модели оценки безопасности сложных систем [Электронный ресурс] / И. В. Чернов // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Материалы 7-й конф. – ИПУ РАН, 1999. – Режим доступа: http://www.sbcinfo.ru/articles/7th_1999conf/5_4.htm. – Загл. с экрана.

186 **Заретский, Г.** Специальная теория относительности и объективность экспериментов [Электронный ресурс] / Г. Заретский // Физика: СТО и объективность экспериментов. – relcom.sci.philosophy, 1999. – Режим доступа: http://ru.laser.ru/philfaq/zarez_sto_i_experiment.html. – Загл. с экрана.

187 **Шишлов, В. И.** Проявление неопределенности при неоднозначности состояний и вариации функции влияния факторов [Электронный ресурс] / В. И. Шишлов. – Томск: Ин-т опт. мониторинга СО РАН, 1999. – Режим доступа: http://lpur.tsu.ru/Public/art99/a012599.html. – Загл. с экрана.

188 **Пузаченко, Ю. Г.** Возможности применения информационно-логического анализа при изучении почвы на примере ее влажности [Текст] / Ю. Г. Пузаченко, Л. О. Карпачевский, Н. А. Знуздаев // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. – М. : Наука, 1970. – С. 103-121.

189 **Хомутов, С. О.** Оценка параметров надежности асинхронных электродвигателей на основе использования информационно-логического анализа [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Наука и молодежь : Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и моло-

дых ученых // Горизонты образования; вып. 8 – Барнаул, 2006. – Режим доступа : http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm – Загл. с экрана.

190 **Хомутов, С. О.** Информационная система управления надежностью электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Измерение, контроль, информатизация : Материалы седьмой Международной научно-технической конференции. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 240-242.

191 **Хомутов, С. О.** Планирование сроков обслуживания и ремонта электродвигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Электрическая изоляция – 2006: Труды Четвертой Международной научно-технической конференции. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – С. 231-232.

192 **Мишин, И. С.** Основные направления повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] / И. С. Мишин, А. А. Глебович // Труды ВСХИЗО. – Вып. 135. – С. 3-10.

193 **Балахонов, А. М.** О роли технической диагностики при эксплуатации асинхронных электродвигателей в сельскохозяйственном производстве [Текст] / А. М. Балахонов // Автоматизация и повышение качества электроснабжения животноводческих и птицеводческих комплексов : сб. науч. тр. – М. : МИИСП, 1981. – С. 28-30.

194 **Технические** средства диагностирования : справочник [Текст] / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др.; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.: ил.

195 **Королев, В. Н.** Условия работы изоляции электрических машин и методы ее испытания [Текст] : дис. … канд. техн. наук / В. Н. Королев. – Ленинград, 1967. – 241 с.

196 **Панасенко, М. А.** Методы прогнозирования надежности электродвигателей [Текст] / М. А. Панасенко, С. О. Хомутов // Наука и молодежь : Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Барнаул, 2008.

197 **Русов, В. А.** Спектральная вибродиагностика [Электронный ресурс] / В. А. Русов, 1996. – Режим доступа : http://www.vibrocenter.ru/book.htm. – Загл. с экрана.

198 **Барков, А. В.** Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации [Текст] : учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб. : Изд. центр СПбГМТУ, 2004. – 152 с.

199 **Минаков, В. Ф.** Обзор современных методов мониторинга электрических машин [Текст] : материалы VII региональной науч.- техн. конф. «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону» / В. Ф. Минаков, С. К. Пустахайлов. – Ставрополь : СевКавГТУ, 2003.

200 **Хомутов, С. О.** Оценка состояния статора электродвигателя на различных этапах его жизненного цикла [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, А. В. Держинский // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 58-й научно-технической конференции студентов, аспирантов

и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – 155 с.

201 **Хомутов, С. О.** Методы и средства оценки технического состояния электродвигателей на предприятиях АПК [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов, О. И. Хомутов // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики : Труды научно-практической конференции с международным участием. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007.

202 **Хомутов, С. О.** Методы и технические средства диагностики электродвигателей в предэксплуатационный период [Текст] / С. О. Хомутов, И. Б. Губин, В. И. Сташко // Ползуновский альманах. – 2002. – №1-2. – С. 84-88.

203 **Суханкин, Г. В.** Ультразвуковая диагностика изоляции обмоток асинхронных электродвигателей в условиях агропромышленного комплекса [Текст] : дис. … канд. техн. наук: 05.20.02 / Г. В. Суханкин. – Барнаул, 2002. – 187 с.

204 **Левачев, А. В.** Методика определения технического состояния изоляции обмотки асинхронного электродвигателя на основе использования метода волновых затухающих колебаний [Текст] / А. В. Левачев // Сб. науч. тр. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 96-99.

205 **Смирнов, В. И.** Автоматизированный вибродиагностический комплекс [Текст] / В. И. Смирнов и др. // Автоматизация и современные технологии. – 1999. – № 10. – С. 23–28.

206 **Брынский, Е. А.** Электромагнитные поля в электрических машинах [Текст] : учебник для вузов / Е. А. Брынский, Я. Б. Данилевич, В. И. Яковлев. – Л. : Энергия, 1979. – 176 с.

207 **Пястолов, А. А.** Эксплуатация силового оборудования в сельском хозяйстве [Текст] / А. А. Пястолов. – М. : Колос, 1964. – 25 с.

208 **Афанасьев, Н. А.** Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий [Текст] / Н. А. Афанасьев, М. А. Юсипов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

209 **Кузнецов, В. А.** Измерения в электронике [Текст] : Справочник / В. А. Кузнецов, В. А. Долгов, В. М. Коневских и др.; под ред. В. А. Кузнецова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.

210 **Хомутов, О. И.** Определение технического состояния обмоток электродвигателей по методу волновых затухающих колебаний [Текст] / О. И. Хомутов, А. В. Левачев, В. И. Сташко // Челябинскому государственному агроинженерному университету – 70 лет. Тезисы докладов на XL научно-технической конференции. – Челябинск, 2001. – С. 251-253.

211 **Грибанов, А. А.** Система обеспечения эксплуатационной надежности городского и промышленного электрооборудования [Текст] // Молодежь – Барнаулу : Тезисы докладов второй городской межвузовской научно-практической конференции / А. А. Грибанов, А. В. Левачев. – Барнаул : БЮИ МВД РФ, 2000. – С. 214-216.

212 **Левачев, А. В.** Диагностика межвитковой изоляции электродвигателей на основе диагностического параметра [Текст] // Материалы и технологии XXI века : Тез. докл. I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых / А. В. Левачев, О. И. Хомутов, В. И. Сташко. – М. : ЦЭИ «Химмаш», 2000. – С. 261-262.

213 **Хомутов, С. О.** Оценка качества ремонта электродвигателей и прогнозирование вероятности их безотказной работы после ремонта [Электронный ресурс] / С. О. Хомутов, Я. Ю. Строков // Наука и молодежь : Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // Горизонты образования; вып. 8 – Барнаул, 2006. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm – Загл. с экрана.

214 **Хомутов, С. О.** Об оценке технического состояния изоляции электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов, Т. Е. Бондаренко, И. Б. Губин // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Материалы IV Российской научно-технической конференции. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2003. – Т.1. – С. 188-190.

215 **Хомутов, С. О.** Использование прогрессивных методов диагностики для оценки качества пропитки и сушки электроизоляционных систем асинхронных двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы : Материалы международной научно-технической конференции. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – С. 197-199.

216 **Хомутов, С. О.** Влияние технического состояния узлов электродвигателя на характеристики его внешнего электромагнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов // Современные методы экспериментальных исследований : Вестник Томского государственного университета : Общенаучный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. – Томск : ТГУ, 2006. – № 64. – С. 94-98.

217 **Хомутов, С. О.** Оценка качества пропитки и сушки электроизоляционных систем асинхронных электродвигателей с использованием прямоугольных тестирующих сигналов [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Электрика. – 2004. – № 6. – С. 18-23.

218 **Пат. 2208236 Российская Федерация**. Способ контроля состояния изоляции обмоток электродвигателя [Текст] / Хомутов О. И., Хомутов С. О., Грибанов А. А., Левачев А. В., Сташко В. И., Суханкин Г. В. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2003. – Бюл. № 19.

219 **Хомутов, С. О.** Разработка методов диагностики асинхронных двигателей малой мощности на основе анализа их ближнего электромагнитного поля [Электронный ресурс] / С. О. Хомутов, А. В. Кондратьева // Наука и молодежь: Труды 2-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // Горизонты образования; вып. 7 – Барнаул, 2005. – С. 121. – Режим доступа:

http://edu.secna.ru/main/review/2005/n7/konf2/ 2ef.pdf. – Загл. с экрана.

220 **Апполонский, С. М.** Моделирование внешних магнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / С. М. Апполонский // Известия вузов. Энергетика. – 1978. – № 7. – С. 126-131.

221 **Сотников, В. В.** Развитие теории внешнего магнитного поля асинхронных двигателей, способов его снижения и измерения [Электронный ресурс] : дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01 / Сотников Владимир Васильевич. – М. : РГБ, 2003.

222 **Барщевский, С. В.** Экспериментальные исследования внешних переменных магнитных полей асинхронных машин [Текст] / С. В. Барщевский, А. В. Рулев // Известия ЛЭТИ. – 1960. – Вып. 42. – С. 290-307.

223 **Баширов, М. Г.** Обеспечение безопасности эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом электромагнитными методами диагностики [Электронный ресурс] / М. Г. Баширов, Д. М. Сайфутдинов // Нефтегазовое дело. – 2002. – Режим доступа : http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/ bash_1.pdf. – Загл. с экрана.

224 **Волохов, С. А.** Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудования [Текст] / С. А. Волохов, П. Н. Добродеев // Электротехника. – 2006. – № 4. – С. 28-33.

225 **Волохов, С. А.** Влияние анизотропии свойств стали ротора на внешнее магнитное поле электрических машин [Текст] / С. А. Волохов, П. Н. Добродеев // Электротехника. – 1997. – № 8. – С. 24-26.

226 **Долуда, В. И.** Повышение достоверности измерений внешних переменных магнитных полей электрооборудования в условиях промышленных помех [Текст] / В. И. Долуда, Ю. А. Зачепа, В. В. Шишка // Техническая электродинамика. – 1996. – №5. – С. 63-65.

227 **Ермолин, Н. П.** Электрические машины [Текст] : учебник для втузов / Н. П. Ермолин. – М. : Высш. шк., 1975.

228 **Копылов, И. П.** Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с., ил.

229 **Иванов-Смоленский, А. В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах [Текст] : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Высш. шк., 1989. – 312 с.

230 **Аполлонский, С. М.** Зависимость момента дипольной модели внешнего магнитного поля электрической машины от режима работы [Текст] / С. М. Аполлонский // Известия вузов. Электромеханика. – 1979. – № 12. – С. 1093-1097.

231 **Добродеев, П. Н.** Влияние токов в контурах соединений на внешнее магнитное поле электрических машин [Текст] // Электротехника. – 1997. – №8. – С. 32-34.

232 **Хомутов, С. О.** Информативность спектра внешнего магнитного поля асинхронного двигателя [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность

машин, приборов и оборудования: Материалы второй Международной научно-технической конференции. Т. II. – Вологда : Изд-во ВоГТУ, 2006. – С. 217-218.

233 **Гашимов, М. А.** Исследование в целях диагностики физических процессов функционирования электрических машин при неисправностях в обмотке статора и ротора [Текст] / М. А. Гашимов, С. В. Абдуладзе // Электротехника. – 2004. – № 2.

234 **Хомутов, С. О.** Исследование процессов дефектообразования, влияющих на параметры внешнего магнитного поля электродвигателя [Текст] / С. О. Хомутов // Современные методы экспериментальных исследований : Вестник Томского государственного университета : Общенаучный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. – Томск : ТГУ, 2006. – № 64. – С. 77-82.

235 **Вольдек, А. И.** Электрические машины [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Высшая школа, 1974. – 824 с.

236 **Иванов-Смоленский, А. В.** Электрические машины [Текст] : Учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.: ил.

237 **Хомутов, С. О.** Внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя как отголосок поля в зазоре [Текст] / С. О. Хомутов, В. В. Бобров, И. Ю. Братухин, В. Н. Веденев // Электроэнергетика в сельском хозяйстве : Материалы Международной научно-практической конференции / Россельхозакадемия. Сиб. регион. отд-ние. – Новосибирск, 2009. – С. 289-292.

238 **Веденев, В. Н.** Определение диагностического параметра для оценки состояния электродвигателя по спектру его внешнего магнитного поля [Текст] / В. Н. Веденев, С. О. Хомутов // Вестник Алтайской науки. – 2008. – № 2 (2). – С. 51-56.

239 **Хомутов, С. О.** Расчет внешнего магнитного поля асинхронного двигателя [Текст] / С. О. Хомутов, В. Н. Веденев // Электроэнергетика в сельском хозяйстве : Материалы Международной научно-практической конференции / Россельхозакадемия. Сиб. регион. отд-ние. – Новосибирск, 2009. – С. 292-298.

240 **Геллер, Б. Н.** Высшие гармоники в асинхронных машинах : пер. с англ. / Б. Н. Геллер, В. Г. Гамата ; под общ. ред. З. Г. Каганова. – М. : Энергия, 1981. – 352 с.

241 **Хомутов, С. О.** Моделирование естественных процессов старения изоляции обмотки статора асинхронных двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. Н. Веденев // Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы второй Международной научно-технической конференции. Т. II. – Вологда : Изд-во ВоГТУ, 2006. – С. 46-48.

242 **Пиотровский, Л. М.** Электрические машины [Текст] : учебник для техникумов / Л. М. Пиотровский. – 7-е изд., стер. – Л. : Энергия, 1974. – 504 с.: ил.

243 **Хомутов, С. О.** Моделирование внешнего магнитного поля асинхронного двигателя с учетом процессов дефектообразования [Текст] / С. О. Хомутов, А. Ю. Алексеенко, В. Г. Тонких // Измерение, контроль, информатизация : Материалы седьмой Международной научно-технической конференции. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 30-37.

244 **Хомутов, С. О.** Взаимосвязь магнитного поля в зазоре и внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя [Текст] / С. О. Хомутов, В. В. Бобров, И. Ю. Братухин, В. Н. Веденев // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : Сборник трудов Международной научно-технической конференции. В 3-х ч. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2009. – Ч. 1. – С. 55-58.

245 **Хомутов, С. О.** Исследование влияния параметров изоляции обмоток статора асинхронного двигателя на характер его внешнего магнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких, В. Н. Веденев // Электрическая изоляция – 2006 : Труды Четвертой Международной научно-технической конференции. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – С. 228-230.

246 **Строков, Я. Ю.** Создание виртуальной лаборатории для исследования ближнего электромагнитного поля электрических машин [Электронный ресурс] / Я. Ю. Строков, С. О. Хомутов // Наука и молодежь : Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // Горизонты образования; вып. 8 – Барнаул, 2006. – Режим доступа:
http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm – Загл. с экрана.

247 **Хомутов, С. О.** Моделирование стохастических процессов в сложных системах на примере оценки надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях : Сборник трудов; вып. 9 / под ред. д.т.н., проф. О.Я. Кравца. – Воронеж : Изд-во «Научная книга», 2004. – 206 с.

248 **Обоишев, Ю. П.** Оценка способов измерений магнитного поля объекта на фоне внешнего магнитного поля [Текст] / Ю. П. Обоишев, М. Ю. Обоишев, Н. М.Семенов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 9. – С. 61-65.

249 **Хомутов, С. О.** Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, А. Ю. Алексеенко, О. В. Бродский, В. Н. Веденев, В. Г. Тонких // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. – 2006. – №2. – С. 9-13.

250 **Барщевский, С. В.** Экспериментальные исследования внешних переменных магнитных полей асинхронных машин [Текст] / С. В. Барщевский, А. В. Рулев // Известия ЛЭТИ. – Л. : 1960. – Вып. 42. – С. 290-307.

251 **Хомутов, С. О.** Методика диагностики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на основе анализа их внешнего магнитного поля [Текст] / В. Н. Веденев, М. Ю. Кононенко, В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Наука и молодежь : Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Горизонты образования. – Барнаул, 2006. – Вып.8. – Режим доступа : http : //edu.secna.ru /main/review/2006 /n8/nim2006 /nim2006.htm – Загл. с экрана.

252 **Хомутов, С. О.** Применение информационно-логического анализа при изучении влияния дефектов асинхронного двигателя на спектр его внешнего магнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Социальные, информационные и энергетические проблемы региона : Вестник Томского государственного университета : Общенаучный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. – Томск : ТГУ, 2006. – № 82. – С. 32-38.

253 **Веденяпин, Г. В.** Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных [Текст] / Г. В. Веденяпин. – М. : Колос, 1967. – 159 с.

254 **Хомутов, С. О.** Дифференцирование дефектов при использовании метода диагностики асинхронных двигателей на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. В. Бобров, И. Ю. Братухин, В. Н. Веденев // Наука и молодежь – 2009 : Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. А. А. Максименко. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2009.

255 **Тонких, В. Г.** О возможности применения обобщенного параметра состояния изоляции при диагностике асинхронных электродвигателей [Текст] / В. Г. Тонких, В. Н. Веденев, С. О. Хомутов // Наука и молодежь – 2007 : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. А. А. Максименко. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 105-107.

256 **Веденев, В. Н.** Перспективы проведения диагностики высоковольтных электродвигателей 6-10 кВ [Текст] / В. Н. Веденев, С. О. Хомутов // Измерение, контроль, информатизация (ИКИ-2008) : 9-я Международная научно-техническая конференция. – Барнаул, 2008. – С. 20-22.

257 **Хомутов, О. И.** Энерго- и ресурсосбережение при эксплуатации и ремонте электродвигателей [Текст] / О. И. Хомутов, В. И. Сташко, А. В. Левачев, А. А. Грибанов // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии : сб. тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2000. – С. 102-104.

258 **Панасенко, М. А.** Прогнозирование работоспособности электродвигателей на основе их диагностики [Текст] / М. А. Панасенко, С. О. Хомутов // Молодежь – Барнаулу: Материалы IX городской научно-практической конференции молодых ученых: в 2 т. – Барнаул : БГПУ, 2008. – Т. 2. – С. 395-396.

259 **Голинкевич, Т. А.** Прикладная теория надежности [Текст] : Учебник для вузов / Т. А. Голинкевич. – М. : Высш. шк., 1985 . – 168 с.

260 **Хомутов, С. О.** Оценка состояния электродвигателей по параметрам магнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких, Е. В. Кобозев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 5. – С. 7-8.

261 **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : Учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – Изд. 8-е. – М. : Высш. шк., 2002 . – 480 с.

262 **Хомутов, С. О.** Определение надежности обмотки статора асинхронного двигателя методом анализа его внешнего электромагнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Автоматизированная подготовка машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования : Материалы Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Вологда : ВоГТУ, 2005. – С. 69-71.

263 **Хомутов, С. О.** Диагностика асинхронных двигателей на основе использования параметров спектра их внешнего магнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, А. Ю. Алексеенко, О. В. Бродский, В. Н. Веденев, В. Г. Тонких // Наука и молодежь: Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // Горизонты образования; вып. 8 – Барнаул, 2006. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm – Загл. с экрана.

264 **Смирнов, А. А.** Диагностика состояния статорной обмотки асинхронного двигателя по характеру спектрального состава его внешнего магнитного поля [Электронный ресурс] / А. А. Смирнов, В. Н. Веденев, С. О. Хомутов // Горизонты образования; вып. 9 – Барнаул, 2007. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/main/review/2007/n9/nim2007/epp.pdf – Загл. с экрана.

265 **Хомутов, С. О.** Комплексный подход к диагностике состояния электродвигателей с использованием параметров их внешнего электромагнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов // Измерение, контроль, информатизация : Материалы седьмой Международной научно-технической конференции. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 61-66.

266 **Хомутов, С. О.** Методика диагностики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на основе анализа их внешнего магнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. Н. Веденев, М. Ю. Кононенко, В. Г. Тонких // Наука и молодежь : Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // Горизонты образования; вып. 8 – Барнаул, 2006. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm – Загл. с экрана.

267 **Хомутов, С. О.** Информатизация исследований в области диагностики состояния полимерных электроизоляционных материалов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях : Сборник трудов; вып 8. – Воронеж : Центрально-Черноземное книжное издательство, 2003. – С. 19-20.

268 **Хомутов, С. О.** Оценка технического состояния электрических двигателей на основе системного анализа характеристик их электромагнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. Н. Веденев, В. Г. Тонких // Измерение, контроль, информатизация : Материалы седьмой Международной научно-технической конференции. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 66-70.

269 **Белова, Т. Ю.** Методические указания к выполнению технико-экономических расчетов в дипломных проектах научно-исследовательского характера для студентов специальности 100400 «Электроснабжение» [Текст] / Т. Ю. Белова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. – 11 с.

270 **Хомутов, С.О.** Повышение эксплуатационной надежности электродвигателей путем проведения предремонтной диагностики изоляции обмоток статора [Текст] / С.О. Хомутов, В.И. Сташко, О.И. Хомутов // Методы и средства измерений физических величин: тез. докл. третьей Всерос. науч.-техн. конф. В 10 ч. Ч. 3 / Под общ. ред. С.М. Никулина. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 1998. – С. 39.

271 **Хомутов, С. О.** Организация системы информационно-программного обеспечения комплекса мероприятий по восстановлению работоспособности электродвигателей на стадии технического обслуживания и ремонта [Текст] / С. О. Хомутов, И. А. Гутов, О. И. Хомутов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 1998. – С. 34-36.

272 **Хомутов, С. О.** Оценка значений параметров волнового затухающего процесса в обмотках электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, О. И. Хомутов, А. А. Грибанов // Вестник Алтайского научного центра Сибирской академии наук высшей школы. – 2005. – № 8. – С. 174-179.

273 **Хомутов, С. О.** Определение электрических параметров межвитковой и корпусной изоляции асинхронных электродвигателей [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, А. В. Левачев // Ползуновский альманах. – 2001. – № 4. – С. 37-43.

274 **Хомутов, С. О.** Многофакторное влияние параметров конструкции электрических машин на результат оценки состояния их полимерной изоляции [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2003. – № 1-2. – С. 121-129.

275 **Хомутов, С. О.** Применение детерминированной модели для прогнозирования состояния изоляции асинхронных электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, И. Б. Губин, О. И. Хомутов // Ползуновский альманах. – 2002. – № 1-2. – С. 92-96.

276 **Пат. 2208234 Российская Федерация.** Устройство для оценки технического состояния изоляции обмоток электродвигателя [Текст] / Хомутов О. И., Хомутов С. О., Грибанов А. А., Левачев А. В., Сташко В. И., Суханкин Г. В. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2003. – Бюл. № 19.

277 **Пат. 2208235 Российская Федерация**. Устройство для автоматической диагностики изоляции обмоток электродвигателя [Текст] / Хомутов

О. И., Хомутов С. О., Грибанов А. А., Левачев А. В., Сташко В. И., Суханкин Г. В. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2003. – Бюл. № 19.

278 **Хомутов, С. О.** Автоматизация диагностики электродвигателей и исследование процесса их ремонта с помощью ЭВМ [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, А. А. Грибанов, А. В. Левачев, В. И. Сташко // Компьютер в современном мире : Тезисы докладов 2-й международной научно-практической конференции. – Чита : ЗИП Сиб. У ПК, 2000. – С. 27-28.

279 **Каганов, З. Г.** Волновые напряжения в электрических машинах [Текст] / З. Г. Каганов. – М. : Энергия, 1970. – 208 с.

280 **Каганов, З. Г.** Витковые напряжения электрических машин [Текст] / З. Г. Каганов. – М. : Энергия, 1970. – 150 с.

281 **Трофимова, Т. И.** Курс физики [Текст] : Учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов / Т. И. Трофимова. – 5-е изд., стереотип. – М. : Высш. шк., 1998. – 543 с.

282 **Левачев, А. В.** Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток [Текст] : дис. … канд. техн. наук : 05.20.02 : защищена 26.12.02 / А. В. Левачев. – Барнаул, 2002. – 145 л.

283 **Теоретические** основы электротехники. Т.1. Основы теории линейных цепей [Текст] : Учебник для электротехн. вузов / Под ред. П. А. Ионкина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1976. – 544 с.

284 **Левачев, А. В.** Математическое моделирование параметров состояния изоляции электродвигателей в зависимости от их конструктивных особенностей [Текст] / А. В. Левачев // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве : Тезисы докладов второй всероссийской научно-технической конференции. Ч. 4. – Нижний Новгород, 2000. – С. 24.

285 **Богородицкий, Н. П.** Электротехнические материалы [Текст] : Учебник для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – 7-е изд., перераб. и доп. –Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1985. – 304 с.: ил.

286 **Хомутов, С. О.** Определение электрических параметров межвитковой и корпусной изоляции асинхронных электродвигателей [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, А. В. Левачев // Ползуновский альманах. – № 4. – 2001. – С. 37-43.

287 **Справочник** по электротехническим материалам [Текст] : В 3-х т. Т.1 / Под ред. Ю. В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М : Энергоатомиздат. 1986. – 368 с. : ил.

288 **Зимин, В. И.** Обмотки электрических машин [Текст] / В. И. Зимин, М. Я. Каплан, М. М. Палей и др. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л : Энергия, 1975. – 488 с. : ил.

289 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле [Текст] : Учебник для электротехн., энерг., приботостроит. спец. вузов / Л. А. Бессонов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 283 с. : ил.

290 **Нейман, Л. Р.** Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан. В 2-х т. Т. 2. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 407 с. : ил.

291 **Асинхронные** двигатели серии 4А [Текст] : Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.: ил.

292 **Петриков, Л. В.** Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация [Текст] : Справочник / Л. В. Петриков, Г. Н. Корначенко. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 496 с.: ил.

293 **Проектирование** электрических машин [Текст] : Учеб. пособие для вузов / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др.; под ред. И. П. Копылова. – М. : Энергия, 1980. – 496 с.: ил.

294 **Хомутов, С. О.** Повышение надежности работы асинхронных двигателей путем разработки методики и технических средств для определения эталонных значений диагностического параметра их изоляции [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2002. – № 1. – С. 26-31.

295 **Хомутов, С. О.** Измерительно-диагностический комплекс для исследования качества изоляционных покрытий [Текст] / С. О. Хомутов, В. И. Сташко, А. В. Левачев // Измерение, контроль, информатизация : Материалы второй международной научно-технической конференции / Под ред. А. Г. Якунина. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – С. 162-164.

296 **Хомутов, С. О.** Новые методы и технические средства диагностики электродвигателей в агропромышленном комплексе [Текст] / С. О. Хомутов, Ю. А. Тонких, В. С. Дронов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 121-127.

297 **Пат. 2283502 Российская Федерация.** Устройство для оценки и прогнозирования технического состояния изоляции электродвигателя [Текст] / Хомутов О. И., Хомутов С. О., Попов А. Н., Свистелко Д. А., Грибанов А. А., Сташко В. И. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2006. – Бюл. № 25.

298 **Пат. 2283503 Российская Федерация.** Устройство для оценки технического состояния изоляции обмоток электродвигателя [Текст] / Хомутов О. И., Хомутов С. О., Попов А. Н., Свистелко Д. А., Грибанов А. А., Сташко В. И. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2006. – Бюл. № 25.

299 **Куртев, Н. Д.** Радиотехника [Текст] : Учеб. для вузов / Н. Д. Куртев, В. И. Нефедов. – М. : МИРЭА, 1997. – 296 с.

300 **Цифровые** интегральные микросхемы [Текст] : Справочник / М. И. Богданович, И. Н. Грель, С. А. Дубина и др. – 2-е изд, перераб. и доп. – Мн. : Беларусь, Полымя, 1996. – 605 с.

301 **Электроника** и микросхемотехника [Текст] : Лабораторный практикум / В. А. Скажепа, А. А. Новацкий, В. И Сенько ; под ред. А. А. Краснопрошиной. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 279 с.

302 **Быстров, Ю. А.** Электронные цепи и устройства [Текст] : Учеб. пособие / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – М. : Высш. шк., 1989. – 287 с.

303 **Горошков, Б. И.** Элементы радиоэлектронных устройств [Текст] : Справочник / Б. И. Горошков. – М. : Радио и связь, 1988. – Вып. 1125. – 176 с. : ил.

304 **Элементы** схем бытовой радиоаппаратуры. Диоды. Транзисторы [Текст] : Справочник / А. И. Аксенов, А. В. Нефедов, А. М. Юшин. – М. : Радио и связь, 1993. – Вып. 1190. – 224 с. : ил.

305 **Полупроводниковые** приборы. Диоды высокочастотные, диоды импульсные, оптоэлектронные приборы [Текст] : Справочник / А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев, В. В. Мокряков и др. ; под ред. А. В. Голомедова. – М. : Радио и связь, 1989. – 592 с. : ил.

306 **Полупроводниковые** приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры [Текст] : Справочник / А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев, В. В. Мокряков и др. ; под ред. А. В. Голомедова. – М. : Радио и связь, 1989. – 528 с. : ил.

307 **Цифровые** и аналоговые интегральные микросхемы [Текст] : Справочник / С. В. Якубовский, Л. И. Ниссельсон, В. И. Кулешова и др. ; под ред. С. В. Якубовского. – М. : Радио и связь, 1990. – 496 с. : ил.

308 **Гутников, В. С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах [Текст] / В. С. Гутников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 304 с. : ил.

309 **Интегральные** микросхемы [Текст] : Справочник / Б. В. Тарабрин, Л. Ф. Лунин, Ю. Н. Смирнов и др. ; под ред. Б. В. Тарабрина. – 2-е изд., испр. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 528 с. : ил.

310 **Полупроводниковые** оптоэлектронные приборы [Текст] : Справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 448 с. : ил.

311 **Пароль, Н. В.** Знакосинтезирующие индикаторы и их применение [Текст] : Справочник / Н. В. Пароль, С. А. Кайдалов. – М. : Радио и связь, 1988. – Вып. 1122. – 128 с. : ил.

312 **Пат. 2283501 Российская Федерация.** Устройство для оценки и прогнозирования технического состояния изоляции обмоток электродвигателя [Текст] / Хомутов О. И., Хомутов С. О., Попов А. Н., Свистелко Д. А., Грибанов А. А., Сташко В. И. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2006. – Бюл. № 25.

313 **Сташко, В. И.** Экспериментальные исследования волновых затухающих процессов в изоляции обмотки электродвигателей [Текст] / М. В. Морозов, А. В. Левачев, В. И. Сташко // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 59-й научно-технической конференции студентов, аспирантов, профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Ч. 1. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – С. 71.

314 **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

315 **Хомутов, С. О.** Обобщающие показатели качества изоляции асинхронных двигателей для оптимизации технологического процесса ее пропитки и сушки [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Ползуновский альманах. – 2004. – № 1. – С. 34-39.

316 **Грибанов, А. А.** Обоснование параметров технологических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, используемых в агропромышленном комплексе [Текст] : дис. … канд. техн. наук: 05.20.02 / А. А. Грибанов. – Барнаул, 2001. – 168 с.

317 **Хомутов, С. О.** Оценка эффективности технологии ремонта изоляции электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, О. И. Хомутов, А. А. Грибанов, В. И. Сташко // Электрика. – 2001. – №3. – С. 24-28.

318 **Хомутов, С. О.** Интенсификация процессов тепломассопереноса в обмотках электрических двигателей путем использования вакуумной технологии пропитки и сушки их изоляции [Текст] / С. О. Хомутов // Вакуумная наука и техника : Материалы XIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов / под ред. Д.В. Быкова. – М. : МИЭМ, 2006. – С. 286-290.

319 **Хомутов, С. О.** Процессы передачи теплоты и массы в электротехнике [Текст] / С. О. Хомутов, А. П. Мамонтов // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 57-й научно-технической конференции студентов, аспирантов, профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – 133 с.

320 **Де Гроот, С. Р.** Термодинамика необратимых процессов [Текст] / С. Р. де Гроот. – М. : Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1956. – 281 с.

321 **Жоу, Д.** Расширенная необратимая термодинамика [Текст] / Д. Жоу, Х. Касас-Баскес, Дж. Лебон. – М. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» ; Институт компьютерных исследований, 2006. – 528 с.

322 **Стратонович, Р. Л.** Нелинейная неравновесная термодинамика [Текст] / Р. Л. Стратонович. – М. : Наука, 1985. – 480 с.

323 **Пригожин, И.** Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – Пер. с англ. – М. : Мир, 2002. – 461 с.

324 **Хомутов, С. О.** Повышение качества восстановления структуры электроизоляционных покрытий [Текст] / С. О. Хомутов // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск, 2000. – №11. – С. 246-254.

325 **Хомутов, С. О.** Применение информационно-логического анализа при изучении стохастических систем на примере оценки надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения : Труды V Международной конференции. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 545-548.

326 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей [Текст] Ч. 2. / С. О. Хомутов, А. С. Свининых, В. Ю. Шерстобитов // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электро-

технологии: Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Тольятти : ТГУ, 2007. – С. 342-345.

327 **Грег, С.** Адсорбция, удельная поверхность, пористость [Текст] / С. Грег. – М. : Химия, 1984. – 180 с.

328 **Хомутов, С. О.** Анализ и учет влияния адсорбции на качество пропитки обмоток электрических машин [Текст] / С. О. Хомутов // Наука, техника, производство : Межвузовский сборник научных трудов. Ч. 1 ; под ред. М. П. Щетинина. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. – С. 49-52.

329 **Лыков, А. В.** Теория тепло- и массопереноса [Текст] / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

330 **Хомутов, С. О.** Анализ влияния адсорбции на пропитку обмоток электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. В. Крайнев, Д. А. Мананников, О. И. Хомутов // Научно-техническое творчество студентов: сб. тез. докл. 56-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава Алтайского гос. техн. ун-та, посвященная 270-летию со дня рождения И.И. Ползунова. Ч. 1 / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 136-137.

331 **Захарченко, В. Н.** Коллоидная химия [Текст] / В. Н. Захарченко. – М. : Высш. шк., 1989. – 238 с.

332 **Адамсон, А.** Физическая химия поверхностей [Текст] / А. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568 с.

333 **Фролов, Ю. Г.** Курс коллоидной химии [Текст] / Ю. Г. Фролов. – М. : Химия, 1982. – 400 с.

334 **Берлин, А. А.** Основы адгезии полимеров [Текст] / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – М. : Химия, 1974. – 404 с.

335 **Тагер, А. А.** Физико-химия полимеров [Текст] / А. А. Тагер. – М. : Госхимиздат, 1968. – 598 с.

336 **Хомутов, С. О.** Исследование и анализ влияния технологических параметров на качество пропитки и сушки изоляции электрических машин [Текст] / С. О. Хомутов // Наука, техника, образование: Межвуз. сб. науч. тр. / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 61-66.

337 **Кельцев, Н. В.** Основы адсорбционной техники [Текст] / Н. В. Кельцев. – М. : Химия, 1984. – 350 с.

338 **Сумм, Б. Д.** Физико-химические основы смачивания и растекания [Текст] / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 232 с.

339 **Филиппов, Ю. В.** Физическая химия [Текст] / Ю. В. Филиппов, М. П. Попович. – М. : Изд-во МГУ, 1980. – 400 с.

340 **Химическая энциклопедия** [Текст]. В 5 т. Т. 1. А – Дарзана. – М. : Сов. энцикл., 1988. – 623 с.

341 **Физическая энциклопедия** [Текст]. Т. 1. – М. : Сов. энцикл., 1988. – 707 с.

342 **Яковлев, А. Д.** Химия и технология лакокрасочных покрытий [Текст] / А. Д. Яковлев. – М. : Химия, 1989. – 320 с.

343 **Тимофеев, Д. П.** Кинетика адсорбции [Текст] / Д. П. Тимофеев. – М. : Химия, 1962. – 240 с.

344 **Лукин, В. Д.** Циклические адсорбционные процессы [Текст] / В. Д. Лукин. – М. : Химия, 1983. – 300 с.

345 **Куц, П. С.** Научные основы кинетики технологии и техники сушки микробиологических материалов [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / П. С. Куц. – Минск, 1979. – 439 с.

346 **Khomutov, S. O.** Electrothermal Vacuum Technology of Restoration of Electric Machines' Insulation [Текст] / S. O. Khomutov, A. A. Soshnikov, O. I. Khomutov // KORUS'99 : Abstracts Third Russian-Korean Intern. Symp. Sci. and Technology. – Novosibirsk : Novosibirsk State Technical University, 1999. – Vol. 2. – P. 776.

347 **Хомутов, О. И.** Многоуровневая система эксплуатационной надежности электрооборудования предприятий и городов [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, В. А. Чагин, В. И. Сташко, О. А. Штраухман // Наука – городу Барнаулу : тез. докл. науч.-практ. конф. – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 1999. – С. 58.

348 **Кокорев А. С.** Справочник молодого обмотчика электрических машин [Текст] / А. С. Кокорев. – М. : Высш. шк., 1985. – 288 с.

349 **Тембель, П. В.** Справочник по обмоточным данным электрических машин и аппаратов [Текст] / П. В. Тембель, Г. В. Геращенко. – Киев, 1981. – 456 с.

350 **Хомутов, С. О.** Когнитивная модель массопереноса в полимерной изоляции электрооборудования [Текст] / С. О. Хомутов // Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Компьютерное моделирование : Тезисы докладов VI международной школы-семинара / под ред. М. Д. Старостенкова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – С. 143-145.

351 **Рашковская, Н. Б.** Сушка в химической промышленности [Текст] / Н. Б. Рашковская. – М. : Химия, 1977. – 138 с.

352 **Куц, П. С.** Аналитическое исследование тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах в условиях вакуума [Текст] / П. С. Куц, И. Ф. Пикус, В. Д. Кононенко. – Минск : ИТМО АН БССР, 1976. – 85 с.

353 **Куц, П. С.** Исследования влияния режима и варианта сушильного процесса на интенсивность сушки и качество [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / П. С. Куц. – Минск, 1964. – 175 с.

354 **Хомутов, С. О.** Разработка когнитивной модели переноса вещества в полимерной изоляции обмоток электрооборудования [Текст] / С. О. Хомутов // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск, 2002. – №8. – С. 47-49.

355 **Khomutov, S. O.** The cognitive model of mass transfer of polymeric insulation in electrical equipment [Текст] / С. О. Хомутов // Defect structures evolution in condensed matters. Computer simulation : Abstracts of the VI International school-seminar. – Barnaul : Altai State Technical University, 2001. – P. 78-79.

356 **Хомутов, С. О.** Предпосылки к созданию перспективных направлений повышения эффективности процессов пропитки и сушки [Текст] / С. О. Хомутов // Наука, техника, образование: Межвуз. сб. науч. тр. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 73–76.

357 **Дульнев, Г. Н.** Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре [Текст] / Г. Н. Дульнев. – М. : Высш. шк., 1984. – 247 с.

358 **Михайлов, М. М.** Влагопроницаемость органических диэлектриков [Текст] / М. М. Михайлов. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1960. – 305 с.

359 **Плановский, А. К.** Сушка дисперсных материалов в химической промышленности [Текст] / А. К. Плановский. – М. : Химия, 1979. – 210 с.

360 **Лыков, А. В.** Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

361 **Изоляция** электрических машин [Текст] / Сб. статей. – М. : Энергия, 1980. – 180 с.

362 **Романовский, С. Г.** Процессы термической обработки влажных материалов [Текст] / С. Г. Романовский. – М. : Химия, 1976. – 200 с.

363 **Процессы** сушки капиллярно-пористых материалов [Текст] / Сб. науч. статей. – М. : Химия, 1979. – 150 с.

364 **Красников, В. В.** Кондуктивная сушка [Текст] / В. В. Красников. – М. : Химия, 1976. – 270 с.

365 **Хомутов, С. О.** Теоретические исследования процессов сушки изоляции обмоток электрических машин и предпосылки к повышению их эффективности [Текст] / С. О. Хомутов, О. И. Хомутов // Наука, техника, образование: Межвуз. сб. науч. тр. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 11-17.

366 **Дерягин, Б. В.** Поверхностные силы [Текст] / Б. В. Дерягин. – М. : Химия, 1985. – 140 с.

367 **Хомутов, С. О.** Электротермовакуумная пропитка и сушка электродвигателей [Текст] : учеб. пособие / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов, О. И. Хомутов, В. И. Сташко, Г. В. Суханкин. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – 370 с.

368 **Голубинский, В. Н.** Интенсификация тепловлагопереноса в процессах сушки [Текст] / В. Н. Голубинский. – М. : Химия, 1979. – 190 с.

369 **Процессы** сушки капиллярно–пористых материалов [Текст] / Сб. науч. статей. – М. : Химия, 1979. – 150 с.

370 **Каверинский, В. С.** Электрические свойства лакокрасочных материалов [Текст] / В. С. Каверинский. – М. : Химия, 1980 – 220 с.

371 **Хомутов, С. О.** Электротермовакуумная технология создания полимерных изоляционных покрытий [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2003 : Труды Региональной школы-семинара. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – 15 с.

372 **Сорвина, О. В.** Повышение эффективности ремонта асинхронных двигателей с использованием результатов разрушающе-восстановительных

экспериментов [Текст] / О. В. Сорвина, В. Н. Сигарев, С. О. Хомутов // Горизонты образования, 2006.

373 **Хомутов, С. О.** Тепловая вакуумная установка для восстановления изоляции ЭД [Текст] / С. О. Хомутов, В. О. Хомутов // Студенты и аспиранты – малому наукоемкому бизнесу : Тр. слета. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – С. 9-11.

374 **А. с. 1270730 СССР.** Смирнов, Г. В. Способ определения массы изоляционного вещества в пропитанных обмотках электротехнических изделий и устройство для его осуществления [Текст] / Г. В. Смирнов, К. Г. Пугачев, В. В. Носов // Изобретения. – 1986. – № 42.

375 **А. с. 1709470 СССР.** Смирнов, Г. В. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин [Текст] / Г. В. Смирнов // Изобретения. – 1992. – № 4.

376 **А. с. 1718343 СССР.** Смирнов, Г. В. Способ определения коэффициента пропитки обмоток электрических машин и устройство для его осуществления [Текст] / Г. В. Смирнов, В. Ф. Дунаф, Э. М. Гусельников // Изобретения. – 1992. – № 9.

377 **Bray, R. C.** Film adhesion studies with the acoustic microscope [Текст] / R. C. Bray, C. F. Quate, J. Calhoum, R. Koch // Thin Solid Films. – 1980. – Vol. 74. – № 2. – P. 295-302.

378 **Свининых, А. С.** Повышение надежности электродвигателей при ремонте [Электронный ресурс] / А. С. Свининых, В. Ю. Шерстобитов, С. О. Хомутов // Горизонты образования. – 2007. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/publish/gorizonty_obrazovania/2007/n9/nim2007/epp.pdf. – Загл. с экрана.

379 **Тареев, Б. М.** Влияние электрического поля на проникновение жидкости в поры изоляции [Текст] / Б. М. Тареев, В. Г. Кирикиас // Вопросы радиоэлектроники. – 1975. – № 1. – С. 168-179.

380 **Хомутов, С. О.** Энергосберегающие вакуумные технологии восстановления изоляции электрических машин [Текст] / С. О. Хомутов // Вакуумная наука и техника : Материалы XI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов / под ред. Д. В. Быкова. – М. : МИЭМ, 2004. – С. 309-312.

381 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности технологического процесса скоростной вакуумной пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей на основе оптимизации его параметров [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Наука и инновационные технологии для регионального развития : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза, 2003. – С. 109-111.

382 **Хомутов, С. О.** Оптимизация параметров технологического процесса восстановления изоляции обмоток ЭД на основе его математического моделирования [Текст] / С. О. Хомутов, Д. В. Есенков // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 58-й научно-технической

конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – 158 с.

383 **Власов, Л. Г.** Применение методов планирования экстремального эксперимента в производстве резисторов [Текст] / Л. Г. Власов, В. Б. Лукьянов, Б. Г. Красильников // Материалы II Всесоюз. конф. по планированию эксперимента. – М. : МЭИ, 1968.

384 **Доспехов, Б. А.** Методика полевого опыта [Текст] / Б. А. Доспехов. – М. : Колос, 1979. – 416 с.

385 **Маркова, Е. В.** Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента [Текст] / Е. В. Маркова, А. Н. Лисенков. – М. : Наука, 1979. – 345 с.

386 **Руководство** по применению латинских планов при планировании эксперимента с качественными факторами [Текст]. – Челябинск, 1971. – 156 с.

387 **Бродский, В. З.** Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание) [Текст] / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова, Е. П. Никитина, Л. А. Панченко. – М. : Металлургия, 1982. – 752 с.

388 **Хомутов, С. О.** Моделирование технологического процесса пропитки и сушки обмоток электродвигателей [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, Д. В. Есенков // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 58-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – 156 с.

389 **Хомутов, С. О.** Методика выбора рациональных технологий пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, О. И. Хомутов, А. А. Грибанов // Ползуновский альманах. – 2001. – №4. – С. 44-52.

390 **Грибанов, А. А.** Математическое моделирование технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей [Текст] / А. А. Грибанов // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: тез. докл. второй Всерос. науч.-техн. конф. (Computer-Based Conference). В 5 ч. Ч. 4. – Нижний Новгород : Межрегион. Верхне-Волжское отд-ние Академии технол. наук РФ, 2000. – С. 25.

391 **Хомутов, С. О.** Совершенствование технологии пропитки и сушки электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа влияния воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2009. – № 1-2. – С. 207-212.

392 **Хомутов, С. О.** Математическая модель скоростной вакуумной технологии ремонта электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 121-129.

393 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2009. – № 1-2. – С. 197-206.

394 **Кобылкин, Н. Г.** Система испытаний и лицензирования машин для животноводства [Текст] / Н. Г. Кобылкин // Технический сервис в АПК. – 1993. – № 2. – С. 12-14.

395 **Сазонов, С. Н.** Особенности использования техники в крестьянских хозяйствах [Текст] / С. Н. Сазонов // Технический сервис в АПК. – 1993. – №3. – С. 15-19.

396 **Морозов, Н. М.** Концепция развития механизации и автоматизации животноводства России [Текст] / Н. М. Морозов // Технический сервис в АПК. – 1993. – № 3. – С. 5-10.

397 **Хомутов, С. О.** Мобильная установка для диагностики и ремонта обмоток статоров электрических машин в условиях сельскохозяйственного производства [Текст] / С. О. Хомутов // Наука, техника, производство: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. М. П. Щетинина. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. – С. 55-58.

398 **Ярошеня, Е. И.** Восстановление изоляции обмоток генераторов и высоковольтных электрических машин [Текст] / Е. И. Ярошеня, В. В. Дубинин, С. Г. Трубачев, М. Е. Найшулер // Электротехника. – 1990. – № 12. – С. 35-38.

399 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности повторного ремонта электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Сборник научных трудов кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 72-73.

400 **Хомутов, С. О.** Разработка стационарной комплексной установки для ремонта статорных обмоток электрических машин [Текст] / С. О. Хомутов, С. И. Бережный, С. В. Диогенов, А. Н. Ахметов // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 57-й научно-технической конференции студентов, аспирантов, профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – С. 131.

401 **Хомутов, О. И.** Электротепловая вакуумная технология пропитки и сушки изоляции электродвигателей [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов // Вакуумная наука и техника : Материалы пятой науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов / Под ред. Д. В. Быкова. – М. : МГИЭМ, 1998. – С. 170-171.

402 **Пат. 2191461 Российская Федерация.** Установка для электротермовакуумного восстановления и ремонта изоляции электротехнических изделий [Текст] / Хомутов О. И., Хомутов С. О., Грибанов А. А., Левачев А. В., Сташко В. И. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2002. – Бюл. № 29.

403 **Хомутов, О. И.** Промышленная технология скоростной вакуумной пропитки и сушки обмоток [Текст] / О. И. Хомутов, В. И. Сташко, С. О. Хомутов // Наука, практика, образование : тр. Алтайск. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова. Вып. 7. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1997. – С. 63-67.

404 **Оборудование** для сушки, пропитки и компаундирования обмоток электрических машин, аппаратов и трансформаторов [Текст]. – М. : ЦИНТИ, 1963.

405 **Пат. 2168831 Российская Федерация.** Способ удаления обмотки из пазов сердечника статора при ремонте электрических машин [Текст] / Хомутов С. О., Хомутов О. И., Держинский А. В. ; заявитель и патентообладатель Барнаул. Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2001. – Бюл. № 16.

406 **Хомутов, С. О.** Мобильная установка поддержания и восстановления работоспособности электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Сошников, А. В. Волков // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 57-й научно-технической конференции студентов, аспирантов, профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – 132 с.

407 **Хомутов, С. О.** Обеспечение надежности асинхронных двигателей на отдаленных предприятиях [Текст] / О. И. Хомутов, А. А. Грибанов, С. О. Хомутов, Д. А. Свистелко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 5. – С. 19-20.

408 **Ванеев, Б. Н.** Экономическая эффективность и контроль надежности асинхронных двигателей [Текст] / Б. Н. Ванеев // Всесоюз. науч.-исслед. проект-но конструкт. и технолог. ин-т взрывозащищенного и рудничного электрооборудования. – Донецк, 1980. – 12 с.

409 **Методика** (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений [Текст] / ВНИИ пат. информ. – М. : ВНИИПИ, 1982. – 41 с.

410 **Методические указания** по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений на предприятиях и в организациях системы «Союзсельхозтехника» [Текст]. – М. : ВНИИПИ, 1983. – 92 с.

411 **Хомутов, С. О.** Комплексный подход к информатизации научных исследований в области повышения качества электроизоляционных покрытий [Текст] / С. О. Хомутов, И. Б. Губин, Е. В. Кобозев // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. – 2003. – №1. – С. 5-7.

412 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности процесса оптимизации параметров технологии ремонта электродвигателя путем создания его информационно-программного обеспечения [Текст] / С. О. Хомутов, А. В. Михайлов // Сборник научных трудов кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – 6 с.

413 **Хомутов, С. О.** Совершенствование и автоматизация технологий пропитки и сушки изоляции обмоток электрических двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Измерение, контроль, информатизация : Материалы восьмой международной научно-технической конференции / под ред.

О. И. Хомутова, Л. И. Сучковой. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 98-100.

414 **Свининых, А. С.** Оптимизация обслуживания и ремонта электродвигателей путем моделирования процессов пропитки и сушки изоляции их обмоток [Текст] / А. С. Свининых, В. Ю. Шерстобитов, С. О. Хомутов // Молодежь – Барнаулу: Тезисы докладов VIII городской научно-практической конференции молодых ученых. – Барнаул, 2007. – С. 302-303.

415 **Хомутов, С. О.** Система управления процессом нанесения электроизоляционных покрытий [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Измерение, контроль, информатизация : Материалы второй международной научно-технической конференции / под ред. А. Г. Якунина. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – С. 159-162.

416 **Конев, Д. Г.** Автоматизированное управление непрерывно-дискретным производством : Учеб. пособие [Текст] / Д. Г. Конев, Ю. М. Ястремский // АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1994. – 176 с.

417 **Лысенко, Э. В.** Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами [Текст] / Э. В. Лысенко. – М. : Радио и связь, 1987. – 272 с.

418 **Хомутов, С. О.** Разработка методики ремонта электродвигателей, эксплуатируемых в неблагоприятных условиях агропромышленного комплекса России [Электронный ресурс] / С. О. Хомутов, Л. А. Сабашкина, И. А. Каурова // Наука и молодежь : Труды 2-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых // Горизонты образования; вып. 7 – Барнаул, 2005. – С. 120. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/main/review/2005/n7/konf2/ 2ef.pdf. – Загл. с экрана.

419 **Хомутов, С. О.** Сокращение затрат энергии и ресурсов при производстве, эксплуатации и ремонте электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, О. И. Хомутов, А. А. Грибанов // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт : Труды второй международной научно-технической конференции. Ч. 2 / под ред. В. П. Горелова и др. – Тобольск : Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2004. – С. 185-187.

420 **Хомутов, С. О.** Экономия энергии и ресурсов при изготовлении и ремонте электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. В. Левачев, А. А. Грибанов // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: Материалы первой региональной научно-практической Интернет-конференции / Орловский региональный центр энергосбережения. – Орел, 2001. – С. 250-252.

421 **Хомутов, С. О.** Повышение качества пропитки капиллярно-пористых материалов на основе скоростного вакуумирования [Текст] / С. О. Хомутов, О. И. Хомутов, А. А. Грибанов // Вестник Алтайского научного центра Сибирской академии наук высшей школы. – 2005. – № 8. – С. 169-174.

422 **Преображенский, В. П.** Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по спец. автоматизация теплоэнергетических процессов

[Текст] / В. П. Преображенский. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.

423 **Каталог** продукции 1999. Омский завод «Эталон». Датчики температуры и оборудование для их проверки, контрольно-измерительные приборы, средства промышленной автоматики [Текст]. – Омск, 1999.

424 **Приборы** и средства автоматизации. Каталог 4.2. Вторичные приборы. ЦНИИТЭИ приборостроения [Текст]. – М., 1988.

425 **Приборы** и средства автоматизации [Текст]. Каталог 4.3. Электроизмерительные приборы и системы ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1988.

426 **Андреева, Л. Е.** Упругие элементы приборов [Текст] / Л. Е. Андреева. – М. : Машгиз, 1962. – 455 с.

427 **Кашарский, Б. Д.** Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины [Текст] / Б. Д. Кашарский, Т. Х. Безновская, В. А. Бек [и др.]. – 3-е изд. – Л. : Машиностроение, 1976. – 485 с.

428 **Чистяков, С. Ф.** Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / С. Ф. Чистяков, Д. В. Радун. – М. : Высш. шк., 1972. – 392 с.

429 **Хомутов, С. О.** Оптимизация методов ремонта электрических машин [Текст] / О. И. Хомутов, С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Научно-техническое творчество молодежи : Сборник тезисов докладов 57-й научно-технической конференции студентов, аспирантов, профессорско-преподавательского состава АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. – 130 с.

430 **Вентцель, Е. С.** Исследование операций: Задачи, принципы, методология [Текст] / Е. С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – М. : Наука, 1988. – 208 с.

431 **Гасс, С.** Линейное программирование (методы и приложения) [Текст] / С. Гасс / Под ред. Д. Б. Юдина. – М. : Физматгиз, 1961. – 304 с.

432 **Кюнци, Г. П.** Нелинейное программирование [Текст] / Г. П. Кюнци, В. Крелле / Под ред. Г. А. Соколова. – М. : Сов. радио, 1965. – 303 с.

433 **Корбут, А. А.** Дискретное программирование [Текст] / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн / Под ред. Д. Б. Юдина. – М. : Наука, 1969. – 368 с.

434 **Бейко, И. В.** Методы и алгоритмы решения задач оптимизации [Текст] / И. В. Бейко, Б. Н. Бубликов, П. Н. Зинько. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1983. – 512 с.

435 **Банди, Б.** Методы оптимизации. Вводный курс [Текст] / Б. Банди; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1988. – 128 с.

436 **Поляк, Б. Т.** Введение в оптимизацию [Текст] / Б. Т. Поляк. – М. : Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 384 с.

437 **Штойер, Р.** Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения [Текст] / Р. Штойер; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1992. – 504 с.

438 **Хомутов, С. О.** Разработка экономического критерия эффективности процесса скоростной вакуумной пропитки и сушки электрических машин с учетом интересов ремонтной и эксплуатирующей организаций [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Сборник научных трудов кафедры «Электро-

снабжение промышленных предприятий». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 31-37.

439 **Грибанов, А. А.** Оптимизация технологий восстановления изоляции электродвигателей [Текст] / А. А. Грибанов, С. О. Хомутов // Материалы и технологии XXI века : тез. докл. I Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых. – М. : ЦЭИ «Химмаш», 2000. – С. 263-265.

440 **Хомутов, С. О.** Математический аппарат для учета особенностей электротехнических изделий, подвергаемых импульсно-вакуумной пропитке и сушке [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Информационные технологии моделирования и управления : Международный сборник научных трудов; вып. 18 / под ред. д.т.н., проф. О. Я. Кравца. – Воронеж : Изд-во «Научная книга», 2004. – С. 175-183.

441 **Красовский, Г. И.** Планирование эксперимента [Текст] / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

442 **Дягтерев, Ю. И.** Методы оптимизации [Текст] : Учеб. пособие для вузов / Ю. И. Дягтерев. – М. : Сов. радио, 1980. – 272 с.

443 **Шапкин, А. С.** Задачи по высшей математике, теории вероятностей, математической статистике, математическому программированию с решениями [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. С. Шапкин. – 2-е изд. – М. : Дашков и К°, 2005. – 432 с.

444 **Пападимитриу, Х.** Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность [Текст] / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 512 с.

445 **Емельянов, А. М.** Структурные сдвиги в аграрном секторе экономики [Текст] : дис. … докт. экон. наук / А. М. Емельянов. – М. : МГУ, 1980. – 324 с.

446 **Миренкова, Г. В.** Агропромышленная интеграция как основной путь преодоления недостаточной технической оснащенности сельскохозяйственного производства [Текст] / Г. В. Миренкова, Е. А. Гусенцова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2007. – № 1 (27). – С. 79-82.

447 **Рау, В. В.** Конкурентоспособность агропродовольственных систем: возможности и факторы роста [Электронный ресурс] / В. В. Рау. – Режим доступа : http://www.ecfor.ru/pdf.php?id=2007/2/03. – Загл. с экрана.

448 **Ушачев, И. Г.** Агропродовольственный сектор: основные направления и проблемы [Текст] / И. Г. Ушачев // Экономист. – 2006. – № 5. – С. 86-94.

449 **Киселев, С. В.** Государственное регулирование сельского хозяйства в условиях переходной экономики [Текст] : дис. … докт. экон. наук / С. В. Киселев. – М. : МГУ, 1994. – 380 с.

450 **Оськин, С. В.** Повышение надежности электропривода сельскохозяйственных машин [Текст] / С. В. Оськин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – №3. – С. 19.

451 **Хомутов, С. О.** Планирование затрат при эксплуатации электрооборудования на основе использования критериев подобия обобщенного хозяйства [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Сборник научных трудов кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 65-72.

452 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности использования денежных средств при эксплуатации электрооборудования путем использования автоматической системы планирования его ремонта [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Современные проблемы информатизации в непромышленной сфере и экономике : Сб. трудов. Вып. 9. – Воронеж, 2004. – С. 132.

453 **Вентцель, М. А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / М. А. Вентцель. – М. : Высш. шк., 1999. – 342 с.

454 **Голинкевич, Т. А.** Прикладная теория надежности [Текст] : учебник для вузов / Т. А. Голинкевич. – М. : Высш. шк., 1985. – 168 с.

455 **Гродзенский, С. Я.** Андрей Андреевич Марков. 1856-1922 [Текст] / С. Я. Гродзенский. – М. : Наука, 1987. – 256 с.

456 **Хомутов, С. О.** Система повышения эффективности обслуживания и ремонта электродвигателей в агропромышленном комплексе [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Социальные, информационные и энергетические проблемы региона : Вестник Томского государственного университета : Общенаучный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. – Томск : ТГУ, 2006. – № 82. – С. 8-14.

457 **Назаров, А. А.** Управляемые системы массового обслуживания [Текст] / А. А. Назаров. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1984. – 234 с.

458 **Правоторова, Н. А.** К определению оптимальной системы массового обслуживания в системе с разнотипными конечными источниками [Текст] / Н. А. Правоторова // Теория и средства автоматики. – 1986. – № 6. – С. 95-97.

459 **Преображенская, А. М.** Об одном способе нахождения оптимального управления марковским процессом с большим числом состояний [Текст] / А. М. Преображенская // Динамика систем. – Горький. – Изд-во горько. ун-та, 1976. – Вып. 9. – С. 164-168.

460 **Преображенская, А. М.** Исследование оптимальных алгоритмов управления системами массового обслуживания с двумя и тремя конфликтными потоками заявок [Текст] / А. М. Преображенская, З. Г. Павлюченок. – Горький : Изд-во горько. ун-та, 1982. – 32 с.

461 **Бронштейн, А. Г.** Об одной управляемой системе обслуживания [Текст] / А. Г. Бронштейн, Е. Б. Беклеров // Известия Ан СССР. Техн. кибернетика. – 1976. – № 5. – С. 101-105.

462 **Бронштейн, А. Г.** Приоритетная система обслуживания с зонами прерываний [Текст] / А. Г. Бронштейн, Г. О. Розенталь // Автоматика и телемеханика. – 1971. – № 7. – С. 162-167.

463 **Бурлаков, М. В.** Об оптимальных абсолютных ситуационных приоритетах в системах массового обслуживания [Текст] / М. В. Бурлаков // Пре-

образователи формы информации для микропроцессорных систем. – Киев : ИК АН СССР, 1982. – С. 59-63.

464 **Хинчин, А. Я.** Теория массового обслуживания [Текст] / А. Я. Хинчин. – М. : Высш. шк., 2001. – 481 с.

465 **Гнеденко, Б. В.** Курс теории вероятностей [Текст] / Б. В. Гнеденко. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М. : Наука, 1988. – 446 с.

466 **Печинкин, А. В**. Система с дисциплиной обслуживания первым наикратчайшего требования без прерывания обслуживания [Текст] / А. В. Печинкин, А. Д. Соловьев // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 2. – С. 87-93.

467 **Марьянович, Т. П.** Обобщение формул Эрланга на случай, когда приборы могут выходить из строя и восстанавливаться [Текст] / Т. П. Марьянович // Украинский математический журнал. – 1960. – №6. – С. 54-70.

468 **Бурлаков, М. В.** Определение минимальных потерь на ожидание в одноканальной системе массового обслуживания [Текст] / М. В. Бурлаков // Кибернетика. – 1984. – №2. – С. 80-83.

469 **Хейер, Х.** Вероятностные меры на локально компактных группах [Текст] / Х. Херберт; пер. с англ. В. Г. Миранцева, С. А. Молчанова и В. В. Ульянова под ред. В. В. Сазонова. – М. : Мир, 1981. – 701 с.

470 **Гмурман, В. Е.** Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 5-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 1999. – 400 с.

471 **Саати, Т. Л.** Элементы теории массового обслуживания и ее приложения [Текст] / Т. Л. Саати. – М. : Советское радио, 1965. – 410 с.

472 **Бурлаков, М. В.** Адаптивное обслуживание заявок с зависящими от времени пребывания ценами потерь [Текст] / М. В. Бурлаков // Адаптивные системы автоматического управления. – 1985. – Вып. 13. – С. 98-101.

473 **Бурлаков, М.В.** Ситуационное управление в системах массового обслуживания с нелинейно зависящими от времени пребывания критериями качества [Текст] / М.В. Бурлаков // Там же. – 1988. – Вып. 16. – С. 128-133.

474 **Горцев, А. М.** Управления и адаптация в системах массового обслуживания [Текст] / А. М. Горцев, А. А. Назаров. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1978. – 208 с.

475 **Джевелл, В. С.** Управляемые полумарковские процессы [Текст] / В. С. Джевелл // Кибернетика. – 1967. – Вып. 4. – С. 87-91.

476 **Ежов, И. И.** Элементы комбинаторики [Текст] / И. И. Ежов, А. В. Скороход. – М. : Наука, 1977. – 80 с.

477 **Кремер, Н. Ш.** Эконометрика [Текст] : учебник для вузов / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко ; под ред. Н. Ш. Кремера. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2005. – 312 с.

478 **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 8-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2002. – 480 с.

479 **Мова, М. В.** Организация приоритетного обслуживания в АСУ [Текст] / М. В. Мова, Л. А. Пономаренко, А. М. Калиновский. – Киев : Техніка, 1997. – 160 с.

480 **Красс, М. С.** Математика для экономических специальностей [Текст] / М. С. Красс ; Акад. народ. хоз-ва при Правительстве Рос. Федерации. – М. : ДЕЛО, 2003. – 704 с.

481 **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] : учеб. пособие для втузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2000. – 480 с.

482 **Чудесенко, В. Ф.** Сборник заданий по специальным курсам высшей математики: типовые расчеты [Текст] / В. Ф. Чудесенко. – 2-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1999. – 128 с.

483 **Кокс, Д.** Теория очередей [Текст] / Д. Кокс, У. Смит. – М. : Мир, 1966. – 489 с.

484 **Пугачев, В. С.** Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учебник для вузов / В. С. Пугачев. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 496 с.

485 **Жалдак, М. И.** Теория вероятностей с элементами информатики [Текст] / М. И. Жалдак; под общ. ред. М. И. Ядренко. – Киев : Выща шк., 1989. – 261 с.

486 **Веников, В.А.** Теория подобия и моделирования [Текст] / В. А. Веников, В. Г. Веников. – М. : Высш. шк., 1976. – 490 с.

487 **Рыбаков, В. А.** Разработка методики планирования ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве на основе математического моделирования их жизненного цикла [Текст] : дис. … канд. техн. наук: 05.20.02 / В. А. Рыбаков. – Барнаул, 2007. – 168 с.

488 **Бусленко, Н. П.** Математическое моделирование производственных процессов [Текст] / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1964. – 283 с.

489 **Шнеденко, Б. В.** Математические методы в теории надежности [Текст] / Б. В. Шнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 409 с.

490 **Риордан, Д. Ж.** Вероятностные системы обслуживания [Текст] / Д. Ж. Риордан. – Л. : Связьиздат, 1963. – 370 с.

491 **Рыбаков, В. А.** Определение одномерного закона распределения времени нахождения единичного электродвигателя в различных состояниях [Электронный ресурс] / В. А. Рыбаков, С. О. Хомутов // Горизонты образования. – 2006. – Режим доступа:
http://edu.secna.ru/publish/gorizonty_obrazovania/2006/n8/nim2006/nim2006.htm.
– Загл. с экрана.

492 **Методическое** пособие для дифференцированного анализа деятельности сельскохозяйственных предприятий в условиях освоения рыночных отношений (федеральный, региональный и хозяйственный уровень) [Текст] / В. М. Скрипченко, Л. И. Хоружий, Э. Н. Скрипченко, Т. Ф. Хромовой. – М. : Изд-во МСХА, 1996. – 292 с.

493 **Севастьянов, В.А.** Эргодическая теория для марковских процессов и ее приложение к телефонным системам с отказами [Текст] / В. А. Севастьянов. – М. : Наука, 1957. – 260 с.

494 **Уиттекер, А. Т.** Курс современного анализа [Текст] / А. Т. Уиттекер, А. Н. Ватсон. – Л. : Физматгиз, 1963. – 486 с.

495 **Козлов, Б. А.** Надежность выделенных подсистем в резервированной системе с восстановлением [Текст] / Б. А. Козлов / Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – № 6. – 1965. – С. 87-96.

496 **Феллер, В.** Введение в теорию вероятностей и ее приложения [Текст] / В. Феллер. – М. : Мир, 1964. – 460 с.

497 **Гнеденко, Б. В.** Замечания к статье Петухова С. И. «Решение одной задачи теории массового обслуживания» [Текст] / Б. В. Гнеденко // Морской сборник. – 1962. – № 2. – С. 12-19.

498 **Башарин, Г. П.** Таблицы вероятностей и среднеквадратических отклонений потерь на полнодоступном пучке линий [Текст] / Г. П. Башарин. – Л. : Изд-во АН СССР, 1962. – 304 с.

499 **Хомутов, С. О.** Оптимизация параметров функционирования системы ремонта электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 206-214.

500 **Мееров, М. В.** Оптимизация систем многосвязного управления [Текст] / М. В. Мееров, Б. Л. Литвак. – М. : Наука, 1972. – 344 с.

501 **Алексеев, В. Б.** Теория оптимизации [Текст] / В. Б. Алексеев. – М. : Высш. шк., 1986. – 390 с.

502 **Веников, Г. В.** Отказы, условия эксплуатации, техническое обслуживание [Текст] / Г. В. Веников, А. М. Соловьев // Эксплуатация и надежность техники. – М. : Знание, 1982. – 64 с.

503 **Рыбаков, В. А.** Повышение эффективности системы массового обслуживания электрооборудования на предприятиях агропромышленного комплекса путем оптимизации процесса планирования его ремонта [Электронный ресурс] / В. А. Рыбаков, С. О. Хомутов, О. И. Хомутов // Горизонты образования. – 2006. – Режим доступа:
http://edu.secna.ru/publish/gorizonty_obrazovania/2006/n8/nim2006/nim2006.htm.
– Загл. с экрана.

504 **Моисеева, Л. В.** Повышение эффективности производственного процесса путем прогнозирования наработки до отказа электрических двигателей [Текст] / Л. В. Моисеева, М. Г. Скрябина, Е. В. Кобозев, С. О. Хомутов // Наука и молодежь : Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Барнаул, 2008.

505 **Хомутов, С. О.** Прогнозирование вероятности безотказной работы электродвигателей на основе количественной оценки степени влияния воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. – 2006. – № 2. – С. 4-8.

506 **Хомутов, С. О.** Автоматическая система планирования ремонта электродвигателей с использованием элементов экспертной системы диагностики и моделирования их технического состояния [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков, В. Г. Тонких // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2003. – С. 38-40.

507 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности ремонтов электродвигателей путем создания экспертной системы оценки их состояния и остаточного ресурса на основе использования результатов диагностики [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Вузовская наука – региону : Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2006. – С. 145-146.

508 **Хомутов, С. О.** Применение искусственных нейронных сетей при прогнозировании технического состояния электродвигателей на основе учета отклонений эксплуатационных характеристик [Текст] / С. О. Хомутов, М. А. Панасенко // Наука и молодежь – 2009 : Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. А.А. Максименко. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2009.

509 **Хомутов, С. О.** Определение технического состояния электродвигателей на основе уравнения долговечности твердого тела [Текст] / С. О. Хомутов, М. А. Панасенко // Электроэнергетика в сельском хозяйстве : Материалы Международной научно-практической конференции / Россельхозакадемия. Сиб. регион. отд-ние. – Новосибирск, 2009. – С. 320-324.

510 **Хомутов, С. О.** Количественная оценка вероятности безотказной работы электрического двигателя с учетом влияния условий его эксплуатации [Текст] Ч. 3 / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Ползуновский вестник. – 2005. –№ 4. – С. 276-280.

511 **Хомутов, С. О.** Количественная оценка степени влияния воздействующих факторов как основа прогноза вероятности безотказной работы электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Вузовская наука – региону: Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2006. – С. 298-299.

512 **Скрябина, М. Г.** Прогнозирование срока службы асинхронного двигателя путем создания математической модели его работы [Текст] / М. Г. Скрябина, Л. В. Моисеева, Е. В. Кобозев, С. О. Хомутов // Молодежь – Барнаулу : Материалы IX городской научно-практической конференции молодых ученых : в 2 т. – Барнаул : БГПУ, 2008. – Т. 2. – С. 400-401.

513 **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности эксплуатации электрооборудования путем использования автоматической системы планирования его ремонта [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Информационные технологии моделирования и управления : Международный сборник научных трудов; вып. 15 / под ред. д.т.н., проф. О.Я. Кравца. – Воронеж : Изд-во «Научная книга», 2004. – С. 127-132.

514 **Горчакова, Л. В.** Прогнозирование срока службы асинхронных электродвигателей на основе их тепловой характеристики [Текст] / Л. В. Горчакова, К. А. Евсюкова, С. О. Хомутов // Молодежь – Барнаулу : Материалы IX городской научно-практической конференции молодых ученых : в 2 т. – Барнаул : БГПУ, 2008. – Т. 2. – С. 383-385.

515 **Хомутов, С. О.** Прогнозирование ресурса асинхронных двигателей в зависимости от величины остаточных послеремонтных повреждений [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков // Ползуновский вестник. – 2007. – №4. – С. 197-205.

516 **Евсюкова, К. А.** Прогнозирование остаточного ресурса промышленных электродвигателей на основе тепловой модели старения их изоляции [Текст] / К. А. Евсюкова, Л. В. Горчакова, М. А. Панасенко, С. О. Хомутов // Наука и молодежь : Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Барнаул, 2008. – С. 14-15.

517 **Хомутов, С. О.** Определение целесообразных интервалов времени проведения мероприятий по восстановлению изоляции асинхронных электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, А. А. Грибанов // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. – 2001. – № 2. – С. 18-23.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложение А

Использование информационно-логического анализа для количественной оценки влияния факторов на наработку до отказа электродвигателя

Таблица А.1 – Зависимость наработки до отказа от различных температур окружающей среды

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	Итого
< 0	2	2	0	0	0	0	0	4
0 – 5	0	3	0	0	0	0	0	3
5 – 10	0	0	3	0	12	0	0	15
10 – 15	0	17	6	11	24	0	0	58
15 – 20	2	12	12	11	11	28	31	107
20 – 25	12	8	8	1	2	12	4	47
> 25	9	1	8	0	1	2	0	21
Итого…	25	43	37	23	50	42	35	255

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$P(A)$
< 0	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
0 – 5	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
5 – 10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	0,06
10 – 15	0,00	0,07	0,02	0,04	0,09	0,00	0,00	0,23
15 – 20	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,11	0,12	0,42
20 – 25	0,05	0,03	0,03	0,00	0,01	0,05	0,02	0,18
> 25	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,08
$P(T)$	0,10	0,17	0,15	0,09	0,20	0,16	0,14	1,00

Продолжение таблицы А.1

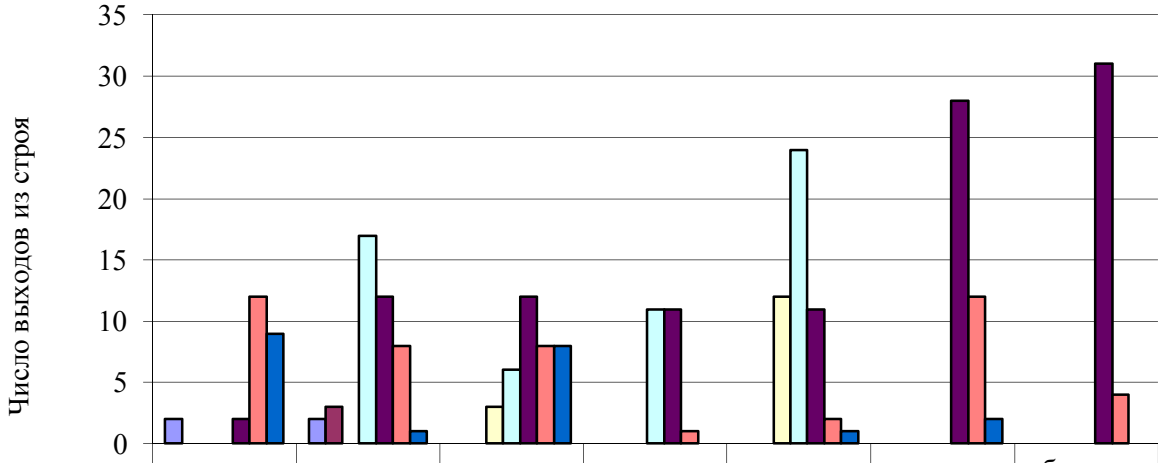
	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
< 0	-0,05	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,09	-0,05
0 – 5	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,12
5 – 10	0,00	0,00	-0,08	0,00	-0,11	0,00	0,00	-0,24	-0,10
10 – 15	0,00	-0,26	-0,13	-0,15	-0,22	0,00	0,00	-0,49	-0,03
15 – 20	-0,05	-0,21	-0,21	-0,20	-0,20	-0,35	-0,37	-0,53	-0,12
20 – 25	-0,21	-0,16	-0,16	-0,03	-0,05	-0,21	-0,09	-0,45	-0,10
> 25	-0,17	-0,03	-0,16	0,00	-0,03	-0,05	0,00	-0,30	-0,06
$p(T)\times$ $\times\log(p(T))$	-0,33	-0,43	-0,40	-0,31	-0,46	-0,43	-0,39		
$H(A/t_j)$	-0,49	-0,74	-0,72	-0,38	-0,61	-0,61	-0,46		

Используя полученные автором исходные данные, а также формулы (1.7) – (1.10), определяем:

– энтропию $H(A)$;
– энтропию $H(T)$;
– количество информации $T(A, T)$;
– коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A: $K(A, B)$.

Для данных, приведенных в таблице А.1:

– энтропия $H(A)$ = -2,08;
– энтропия $H(T)$ = -2,76;
– количество информации $T(A, T)$ = -0,60;
– коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A: $K(A, B)$ = 0,2160277.



	меньше 1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-6000	больше 6000
меньше 0	2	2	0	0	0	0	0
0-5	0	3	0	0	0	0	0
5 10	0	0	3	0	12	0	0
10 15	0	17	6	11	24	0	0
15 20	2	12	12	11	11	28	31
20 25	12	8	8	1	2	12	4
больше 25	9	1	8	0	1	2	0

Время работы, ч

Рисунок А.1 – Гистограмма зависимости наработки до отказа от различных температур окружающей среды

Таблица А.2 – Зависимость наработки до отказа от влажности окружающей среды

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	Итого	
< 40	0	0	0	0	0	0	0	0	
40 – 50	0	0	0	1	3	1	0	5	
50 – 55	0	0	1	0	13	13	0	27	
55 – 60	0	6	8	2	12	7	1	36	
60 – 65	0	10	7	0	2	1	0	20	

Продолжение таблицы А.2

65 – 70	12	16	5	0	0	0	0	33	
> 70	31	12	10	0	0	3	3	59	
Итого…	43	44	31	3	30	25	4	180	
	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$P(A)$	
< 40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
40 – 50	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,03	
50 – 55	0,00	0,00	0,01	0,00	0,07	0,07	0,00	0,15	
55 – 60	0,00	0,03	0,04	0,01	0,07	0,04	0,01	0,20	
60 – 65	0,00	0,06	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,11	
65 – 70	0,07	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	
> 70	0,17	0,07	0,06	0,00	0,00	0,02	0,02	0,33	
$P(T)$	0,24	0,24	0,17	0,02	0,17	0,14	0,02	1,00	

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
< 40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,10
40 – 50	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,10	-0,04	0,00	-0,14	-0,24
50 – 55	0,00	0,00	-0,04	0,00	0,00	-0,27	0,00	-0,41	-0,14
55 – 60	0,00	-0,16	-0,20	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,46	0,00
60 – 65	0,00	-0,23	-0,18	0,00	-0,07	-0,04	0,00	-0,35	-0,03

Продолжение таблицы А.2

65 – 70	0,00	-0,31	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,45	-0,06
> 70	-0,44	-0,26	-0,23	0,00	0,00	-0,10	-0,09	-0,53	0,00
$p(T) \times \times \log(p(T))$	-0,49	-0,50	-0,44	-0,10	-0,43	-0,40	-0,12		
$H(A/t_j)$	-0,44	-0,97	-0,80	-0,04	-0,17	-0,46	-0,13		

Для данных, представленных в таблице А.2, находим:

– $H(A) = -2{,}35$;

– $H(T) = -2{,}47$;

– $T(A, T) = -0{,}57$;

– $K(A, B) = 0{,}2317779$.

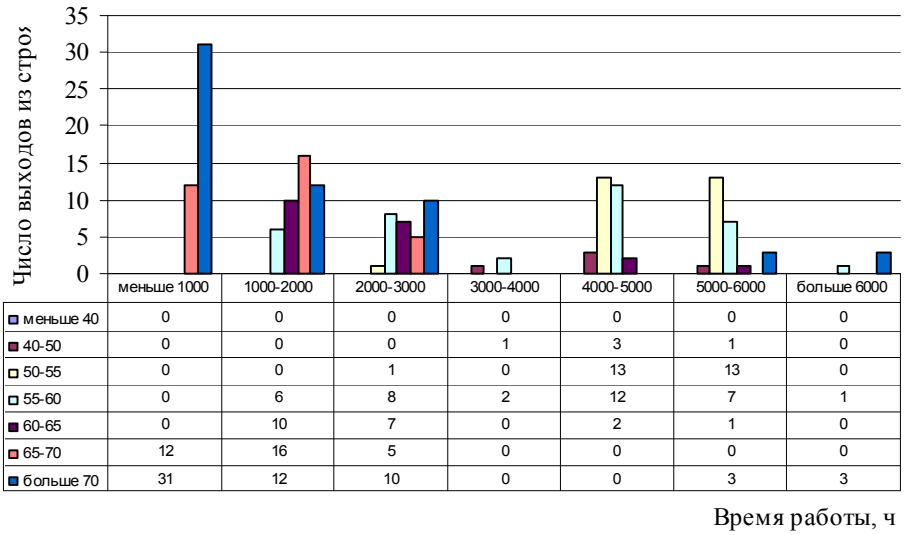
Таблица А.3 – Зависимость наработки до отказа от числа пусков

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	Итого
1	0	1	1	1	1	10	1	15
1 – 6	1	1	1	1	6	21	1	32
6 – 10	1	1	1	7	1	3	1	15
10 – 15	1	1	1	1	1	1	1	7
15 – 20	1	1	19	1	2	1	1	26
20 – 25	1	7	1	1	1	1	1	13
> 25	15	1	1	1	1	3	3	25
Итого…	20	13	25	13	13	40	9	133

Продолжение таблицы А.3

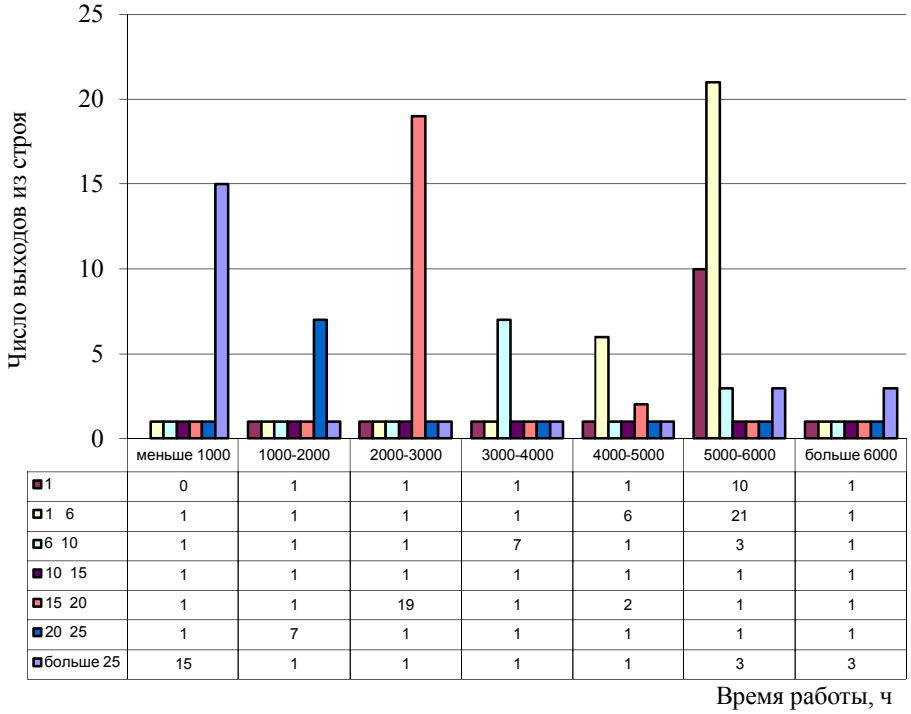
	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$P(A)$
1	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,11
1 – 6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,16	0,01	0,24
6 – 10	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01	0,11
10 – 15	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
15 – 20	0,01	0,01	0,14	0,01	0,02	0,01	0,01	0,20
20 – 25	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10
> 25	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,19
$P(T)$	0,15	0,10	0,19	0,10	0,10	0,30	0,07	1,00

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,05
1 – 6	0,00	0,00	0,00	-0,05	-0,20	-0,42	0,00	-0,49	-0,04
6 – 10	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,00	-0,12	0,00	-0,36	-0,12
10 – 15	0,00	-0,05	-0,05	0,00	0,00	0,00	-0,05	-0,22	-0,01
15 – 20	0,00	-0,05	-0,40	0,00	-0,09	-0,05	0,00	-0,46	-0,03
20 – 25	0,00	-0,22	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,33	-0,22
> 25	-0,36	-0,05	-0,05	0,00	0,00	-0,12	-0,09	-0,45	-0,01
$p(T)\times$ $\times$ $\log(p(T))$	-0,41	-0,33	-0,45	-0,33	-0,33	-0,52	-0,26		
$H(A/t_j)$	-0,36	-0,38	-0,61	-0,05	-0,29	-0,72	-0,14		



	меньше 1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-6000	больше 6000
меньше 40	0	0	0	0	0	0	0
40-50	0	0	0	1	3	1	0
50-55	0	0	1	0	13	13	0
55-60	0	6	8	2	12	7	1
60-65	0	10	7	0	2	1	0
65-70	12	16	5	0	0	0	0
больше 70	31	12	10	0	0	3	3

Рисунок А.2 – Гистограмма зависимости наработки до отказа от влажности окружающей среды



	меньше 1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-6000	больше 6000
1	0	1	1	1	1	10	1
1 6	1	1	1	1	6	21	1
6 10	1	1	1	7	1	3	1
10 15	1	1	1	1	1	1	1
15 20	1	1	19	1	2	1	1
20 25	1	7	1	1	1	1	1
больше 25	15	1	1	1	1	3	3

Рисунок А.3 – Гистограмма зависимости наработки до отказа от числа пусков

Для данных, приведенных в таблице А.3, находим:

– $H(A)$ = -2,31;

– $H(T)$ = -2,63;

– $T(A, T)$ = -0,47;

– $K(A, B) = 0{,}1770411$.

Таблица А.4 – Зависимость наработки до отказа от времени работы в сутки

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	Итого
< 7	0	0	1	0	0	10	1	12
7 – 10	0	1	1	1	6	21	1	31
10 – 12	1	1	1	7	1	3	1	15
12 – 15	1	12	1	11	1	1	1	28
15 – 17	0	1	19	1	2	1	1	25
17 – 20	1	17	1	1	1	1	1	23
> 20	1	1	15	1	1	3	3	25
Итого…	4	33	39	22	12	40	9	159
	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$P(A)$
< 7	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06	0,01	0,08
7 – 10	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	0,13	0,01	0,19
10 – 12	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	0,09
12 – 15	0,01	0,08	0,01	0,07	0,01	0,01	0,01	0,18
15 – 17	0,00	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01	0,01	0,16
17 – 20	0,01	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,14
> 20	0,01	0,01	0,09	0,01	0,01	0,02	0,02	0,16
$P(T)$	0,03	0,21	0,25	0,14	0,08	0,25	0,06	1,00
	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
< 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 – 10	0,00	0,00	0,00	-0,05	-0,18	-0,39	0,00	-0,46	-0,15

Продолжение таблицы А.4

10 – 12	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,00	-0,11	0,00	-0,32	-0,20
12 – 15	0,00	-0,28	-0,05	0,00	0,00	0,00	-0,05	-0,44	-0,01
15 – 17	0,00	-0,05	-0,37	0,00	-0,08	-0,05	0,00	-0,42	-0,02
17 – 20	0,00	-0,34	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,40	-0,16
> 20	-0,05	-0,05	-0,32	0,00	0,00	-0,11	-0,08	-0,42	-0,01
$p(T)\log(p(T))$	-0,13	-0,47	-0,50	-0,39	-0,28	-0,50	-0,23		
$H(A/t_j)$	-0,05	-0,72	-0,83	-0,05	-0,26	-0,65	-0,12		

– $H(A) = -2{,}47$;

– $H(T) = -2{,}51$;

– $T(A, T) = -0{,}55$;

– $K(A, B) = 0{,}2182555$.

Таблица А.5 – Зависимость наработки до отказа от примесей в окружающей среде

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	Итого
Нет	7	20	22	3	14	2	10	78
Пыль	19	22	17	5	2	13	10	88
Аммиак	11	2	1	0	1	5	0	20
Загазованность	0	1	1	0	4	1	1	8
Корундовая пыль	0	1	2	4	1	1	0	9
Итого…	37	46	43	12	22	22	21	203

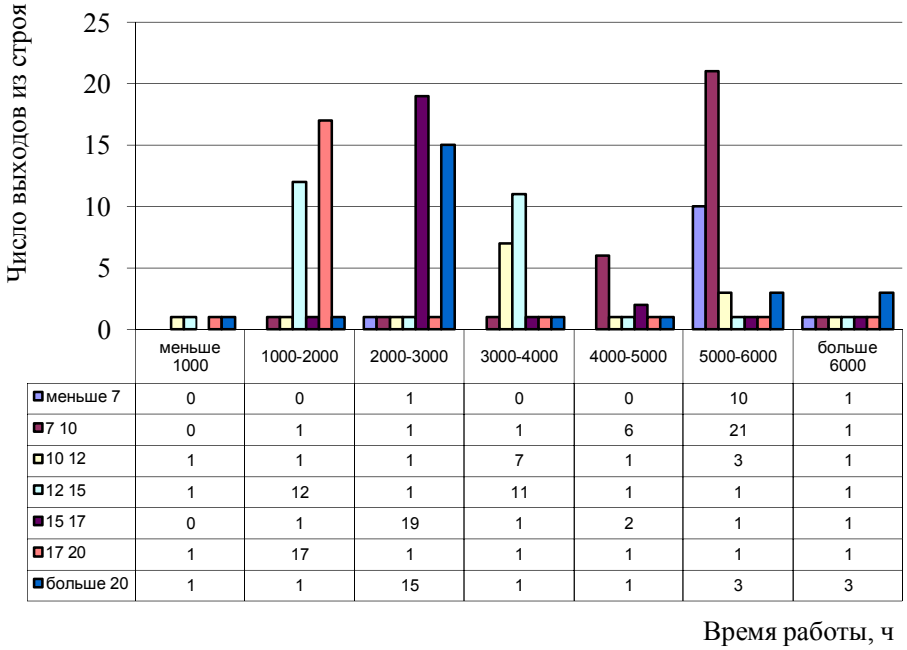
Продолжение таблицы А.5

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$P(A)$
Нет	0,03	0,10	0,11	0,01	0,07	0,01	0,05	0,38
Пыль	0,09	0,11	0,08	0,02	0,01	0,06	0,05	0,43
Аммиак	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,10
Загазованность	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04
Корундовая пыль	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,04
$P(T)$	0,18	0,23	0,21	0,06	0,11	0,11	0,10	1,00

	< 1000	1000 – 2000	2000 – 3000	3000 – 4000	4000 – 5000	5000 – 6000	> 6000	$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
Нет	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Пыль	0,00	0,00	0,00	-0,13	-0,07	-0,25	0,00	-0,52	-0,02
Аммиак	0,00	0,00	-0,04	0,00	0,00	-0,13	0,00	-0,33	-0,03
Загазованность	0,00	-0,04	-0,04	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,18	-0,01
Корундовая пыль	0,00	-0,04	-0,07	0,00	-0,04	-0,04	0,00	-0,20	-0,01
$p(T)\log(p(T))$	-0,45	-0,49	-0,47	-0,24	-0,35	-0,35	-0,34		
$H(A/t_j)$	0,00	-0,08	-0,14	-0,13	-0,10	-0,42	-0,04		

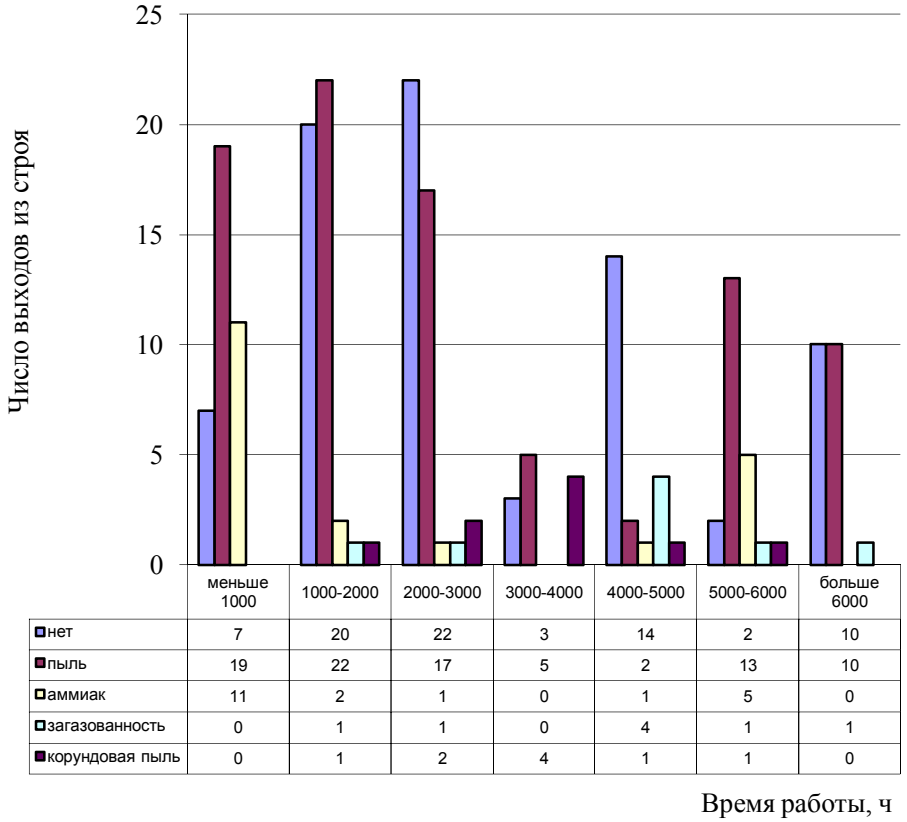
Для данных, приведенных в таблице А.5:

$H(A) = -1{,}24$; $H(T) = -2{,}68$; $T(A, T) = -0{,}07$; $K(A, B) = 0{,}0246127$.



	меньше 1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-6000	больше 6000
меньше 7	0	0	1	0	0	10	1
7 10	0	1	1	1	6	21	1
10 12	1	1	1	7	1	3	1
12 15	1	12	1	11	1	1	1
15 17	0	1	19	1	2	1	1
17 20	1	17	1	1	1	1	1
больше 20	1	1	15	1	1	3	3

Рисунок А.4 – Гистограмма зависимости наработки до отказа от времени работы в сутки



	меньше 1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-6000	больше 6000
нет	7	20	22	3	14	2	10
пыль	19	22	17	5	2	13	10
аммиак	11	2	1	0	1	5	0
загазованность	0	1	1	0	4	1	1
корундовая пыль	0	1	2	4	1	1	0

Рисунок А.5 – Гистограмма зависимости наработки до отказа от примесей в окружающей среде

Приложение Б

Эталонные значения ОДП для различных двигателей серии 4А

Таблица Б.1 – Номинальные и эталонные значения параметров электрических двигателей серии 4А

Тип электродвигателя	$P_{2ном}$, кВт	$2p$	n_c, об/мин	$C_в$, пФ	$C_к$, пФ	$\Psi_{эт}$, о. е.
4АА63В2У3	0,55	2	3000	49,1	262,4	30
4АА63А4У3	0,25	4	1500	37	260,5	29
4АА63В4У3	0,37	4	1500	40,3	308	34
4АА63А6У3	0,18	6	1000	33,5	357,7	39
4АА63В6У3	0,25	6	1000	39,1	476,4	49
4А71А2У3	0,75	2	3000	57,8	232,2	29
4А71В2У3	1,1	2	3000	58,6	259	31
4А71А4У3	0,55	4	1500	46,2	259,1	31
4А71В4У3	0,75	4	1500	49,2	287	33
4АА71А6У3	0,37	6	1000	42,4	370,9	35
4АА71В6У3	0,55	6	1000	48	472,5	52
4А80А2У3	1,5	2	3000	67,4	292,4	35
4А80В2У3	2,2	2	3000	74,4	351,9	43
4А80А4У3	1,1	4	1500	55,1	396,4	43
4А80В4У3	1,5	4	1500	60,9	476,6	51
4А80А6У3	0,75	6	1000	46,9	431,6	47
4А80В6У3	1,1	6	1000	58,1	598,6	64
4А90L2У3	3,0	2	3000	82,3	362,9	46

Продолжение таблицы Б.1

Тип электродвигателя	$P_{2ном}$, кВт	$2p$	n_c, об/мин	$C_в$, пФ	$C_к$, пФ	$\Psi_{эт}$, о.е.
4A90L4У3	2,2	4	1500	66,6	487	57
4A90L6У3	1,5	6	1000	61,7	575,4	63
4A100S2У3	4,0	2	3000	92,1	451,2	53
4A100L2У3	5,5	2	3000	99,8	543,6	63
4A100S4У3	3,0	4	1500	72,2	502,1	59
4A100L4У3	4,0	4	1500	82,1	624,9	68
4A100L6У3	2,2	6	1000	67,3	584,7	63
4A112M2У3	7,5	2	3000	102,3	521,7	65
4A112M4У3	5,5	4	1500	84,5	588,7	67
4A112MA6У3	3,0	6	1000	65,6	674,8	73
4A112MB6У3	4,0	6	1000	73,6	812,3	91
4A132M2У3	11	2	3000	112,3	582,1	67
4A132S4У3	7,5	4	1500	87,1	666,9	78
4A132M4У3	11	4	1500	98,2	1020	97
4A132S6У3	5,5	6	1000	73,9	887,5	90
4A132M6У3	7,5	6	1000	88,2	1150	98
4A160S2У3	15	2	3000	110,4	583,7	53
4A160M2У3	18,5	2	3000	120,4	687,4	70
4A160S4У3	15	4	1500	100,8	944,7	105
4A160M4У3	18,5	4	1500	113,7	1175	122
4A160S6У3	11	6	1000	90,5	994,4	97
4A160M6У3	15	6	1000	97,1	1268	147

Продолжение таблицы Б.1

Тип электродвигателя	$P_{2ном}$, кВт	$2p$	n_c, об/мин	$C_в$, пФ	$C_к$, пФ	$\Psi_{эт}$, о.е.
4А180S2У3	22	2	3000	108,1	591,1	74
4А180М2У3	30	2	3000	127,8	737,8	85
4А180S4У3	22	4	1500	108,6	950,4	116
4А180М4У3	30	4	1500	116,9	1205	140
4А180М6У3	18,5	6	1000	94,7	1216	136
4А200М2У3	37	2	3000	132,5	754,1	76
4А200L2У3	45	2	3000	136,3	941,9	89
4А200М4У3	37	4	1500	126,7	1098	103
4А200L4У3	45	4	1500	138	1462	158,4
4А200М6У3	22	6	1000	103,7	1432	140
4А200L6У3	30	6	1000	112,2	1586	155
4А225М2У3	55	2	3000	154,8	1088	134
4А225М4У3	55	4	1500	143,2	1480	199
4А225М6У3	37	6	1000	119,7	1665	159
4А250S6У3	45	6	1000	127	1747	178
4А250М6У3	55	6	1000	132	1970	219

Приложение В

Применение информационно-логического анализа для скоростного вакуумного метода пропитки и сушки изоляции

Таблица В.1 – Количество попаданий ранга глубины вакуума в определенный ранг ОДП

Глубина вакуума, о.е.	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Итого
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0,4	4	3	11	4	0	0	0	22
0,5	2	2	1	5	1	0	0	11
0,6	1	2	1	3	4	0	0	11
0,7	1	1	1	1	4	3	0	11
0,8	0	1	2	1	2	7	0	13
0,9	0	1	1	1	2	6	0	11
1	0	2	2	2	8	7	1	22
Итого	8	12	19	17	21	23	1	101

Таблица В.2 – Вероятность попадания ранга глубины вакуума в определенный ранг ОДП

Глубина вакуума, о.е.	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Суммарная вероятность $P(A)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0,4	0,04	0,03	0,11	0,04	0,00	0,00	0,00	0,22
0,5	0,02	0,02	0,01	0,05	0,01	0,00	0,00	0,11
0,6	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,00	0,00	0,11
0,7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,00	0,11
0,8	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,07	0,00	0,13
0,9	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06	0,00	0,11
1	0,00	0,02	0,02	0,02	0,08	0,07	0,01	0,22
Суммарная вероятность $P(T)$	0,08	0,12	0,19	0,17	0,21	0,23	0,01	1,00

Таблица В.3 – Неопределенность попадания ранга глубины вакуума в определенный ранг ОДП

Глубина вакуума, о.е.	Эмпирическая вероятность классов ОДП							$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9		
0,4	-0,18	-0,15	-0,35	-0,18	0,00	0,00	0,00	-0,48	0,03
0,5	-0,11	-0,11	-0,07	-0,21	-0,07	0,00	0,00	-0,35	0,08
0,6	-0,07	-0,11	-0,07	-0,15	-0,18	0,00	0,00	-0,35	0,16
0,7	-0,07	-0,07	-0,07	-0,07	-0,18	-0,15	0,00	-0,35	0,14
0,8	0,00	-0,07	-0,11	-0,07	-0,11	-0,27	0,00	-0,38	0,20
0,9	0,00	-0,07	-0,07	-0,07	-0,11	-0,24	0,00	-0,35	0,21
1	0,00	-0,11	-0,11	-0,11	-0,29	-0,27	-0,07	-0,48	0,00
$p(T)\cdot\log(p(T))$	-0,29	-0,37	-0,45	-0,43	-0,47	-0,49	-0,07	–	–
$H(A/t_j)$	0,43	0,68	0,84	0,86	0,95	0,93	0,07	–	–

На основе полученных результатов у нас появляется возможность определить необходимые показатели:

– энтропия $H(A) = 2{,}73$;

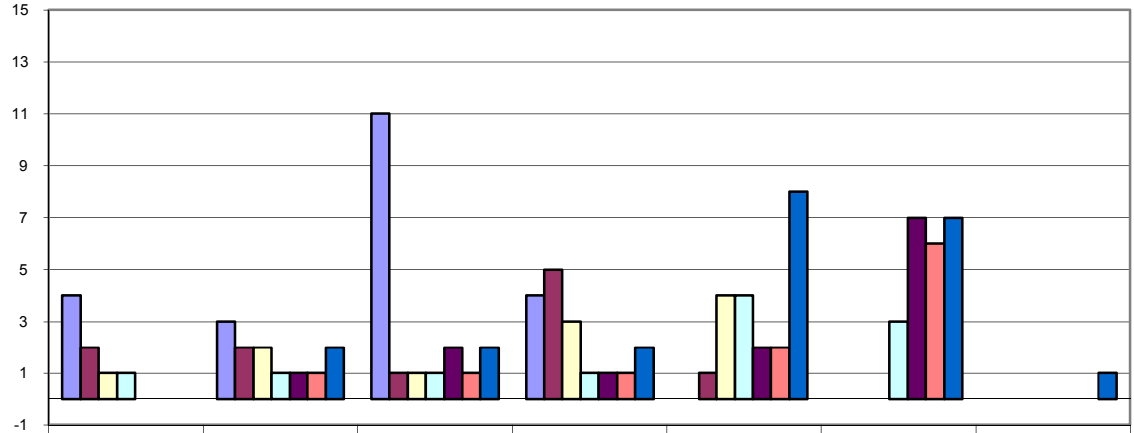
– энтропия $H(T) = 2{,}56$;

– количество информации $T(A,T) = 0{,}86$;

– коэффициент эффективности передачи информации $K(A,B) = 0{,}262$.

Таблица В.4 – Количество попаданий ранга времени пропитки в определенный ранг ОДП

Время пропитки, мин	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Итого
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0-3	8	2	0	0	0	0	0	10
3-6	0	10	19	9	0	0	0	38
6-9	0	0	0	8	17	0	0	25
9-12	0	0	0	0	4	8	0	12
12-15	0	0	0	0	0	6	0	6
15-18	0	0	0	0	0	9	1	10
Итого	8	12	19	17	21	23	1	101



	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9
0,4	4	3	11	4	0	0	0
0,5	2	2	1	5	1	0	0
0,6	1	2	1	3	4	0	0
0,7	1	1	1	1	4	3	0
0,8	0	1	2	1	2	7	0
0,9	0	1	1	1	2	6	0
1	0	2	2	2	8	7	1

Рисунок В.1 – Гистограмма зависимости ОДП от глубины вакуума

Таблица В.5 – Вероятность попадания ранга времени пропитки в определенный ранг ОДП

Время пропитки, мин	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Суммарная вероятность, $P(A)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0-3	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
3-6	0,00	0,10	0,19	0,09	0,00	0,00	0,00	0,38
6-9	0,00	0,00	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,25
9-12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,00	0,12
12-15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,06
15-18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01	0,10
Суммарная вероятность, $P(T)$	0,08	0,12	0,19	0,17	0,21	0,23	0,01	1,00

Таблица В.6 – Неопределенность попадания ранга времени пропитки в определенный ранг ОДП

Время пропитки, мин	Эмпирическая вероятность классов ОДП							$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9		
0-3	-0,29	-0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,33	0,02
3-6	0,00	-0,33	-0,45	-0,31	0,00	0,00	0,00	-0,53	0,05
6-9	0,00	0,00	0,00	-0,29	-0,43	0,00	0,00	-0,50	0,09
9-12	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,18	-0,29	0,00	-0,37	0,10
12-15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,24	0,00	-0,24	0,13
15-18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,31	-0,07	-0,33	0,19
$p(T)\times$ $\times\log(p(T))$	-0,29	-0,37	-0,45	-0,43	-0,47	-0,49	-0,07	–	–
$H(A/t_j)$	0,29	0,44	0,45	0,60	0,62	0,84	-0,07	–	–

Определяем:

– энтропию $H(A) = 2{,}30$;

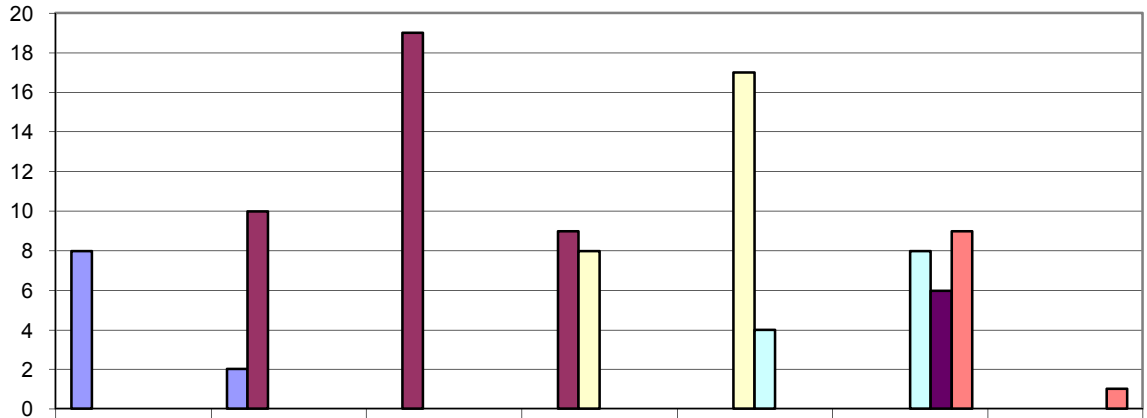
– энтропию $H(T) = 2{,}56$;

– количество информации $T(A,T) = 0{,}58$;

– коэффициент эффективности передачи информации $K(A,B) = 0{,}167$.

Таблица В.7 – Количество попаданий ранга температуры пропитки в определенный ранг ОДП

Температура пропитки, °С	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Итого
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0-20	8	10	6	3	0	0	1	28
20-40	0	2	5	3	8	0	0	18
40-60	0	0	4	4	4	6	0	18
60-80	0	0	2	3	4	10	0	19
80-100	0	0	2	4	5	7	0	18
Итого	8	12	19	17	21	23	1	101



	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9
0-3	8	2	0	0	0	0	0
3-6	0	10	19	9	0	0	0
6-9	0	0	0	8	17	0	0
9-12	0	0	0	0	4	8	0
12-15	0	0	0	0	0	6	0
15-18	0	0	0	0	0	9	1

Рисунок В.2 – Гистограмма зависимости ОДП от времени пропитки

Таблица В.8 – Вероятность попадания ранга температуры пропитки в определенный ранг ОДП

Температура пропитки, °С	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Суммарная вероятность, $P(A)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0-20	0,08	0,10	0,06	0,03	0,00	0,00	0,01	0,28
20-40	0,00	0,02	0,05	0,03	0,08	0,00	0,00	0,18
40-60	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,06	0,00	0,18
60-80	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,10	0,00	0,19
80-100	0,00	0,00	0,02	0,04	0,05	0,07	0,00	0,18
Суммарная вероятность, $P(T)$	0,08	0,12	0,19	0,17	0,21	0,23	0,01	1,00

Таблица В.9 – Неопределенность попадания ранга температуры пропитки в определенный ранг ОДП

Температура пропитки, °С	Эмпирическая вероятность классов ОДП							$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9		
0-20	-0,29	-0,33	-0,24	-0,15	0,00	0,00	-0,07	-0,51	0,02
20-40	0,00	-0,11	-0,21	-0,15	-0,29	0,00	0,00	-0,44	0,05
40-60	0,00	0,00	-0,18	-0,18	-0,18	-0,24	0,00	-0,44	0,16
60-80	0,00	0,00	-0,11	-0,15	-0,18	-0,33	0,00	-0,45	0,14
80-100	0,00	0,00	-0,11	-0,18	-0,21	-0,27	0,00	-0,44	0,18
$p(T)\times$ $\times\log(p(T))$	-0,29	-0,37	-0,45	-0,43	-0,47	-0,49	-0,07	–	–
$H(A/t_j)$	0,29	0,44	0,87	0,82	0,87	0,84	0,07	–	–

Определяем:

– энтропию $H(A) = 2,30$;

– энтропию $H(T) = 2,56$;

– количество информации $T(A,T) = 0,5581$;

– коэффициент эффективности передачи информации $K(A,B) = 0,163$.

Таблица В.10 – Количество попаданий ранга температуры сушки в определенный ранг ОДП

Температура сушки, °С	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Итого
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
80	5	4	9	1	6	1	0	26
100	3	8	10	16	15	22	1	75
Итого	8	12	19	17	21	23	1	101

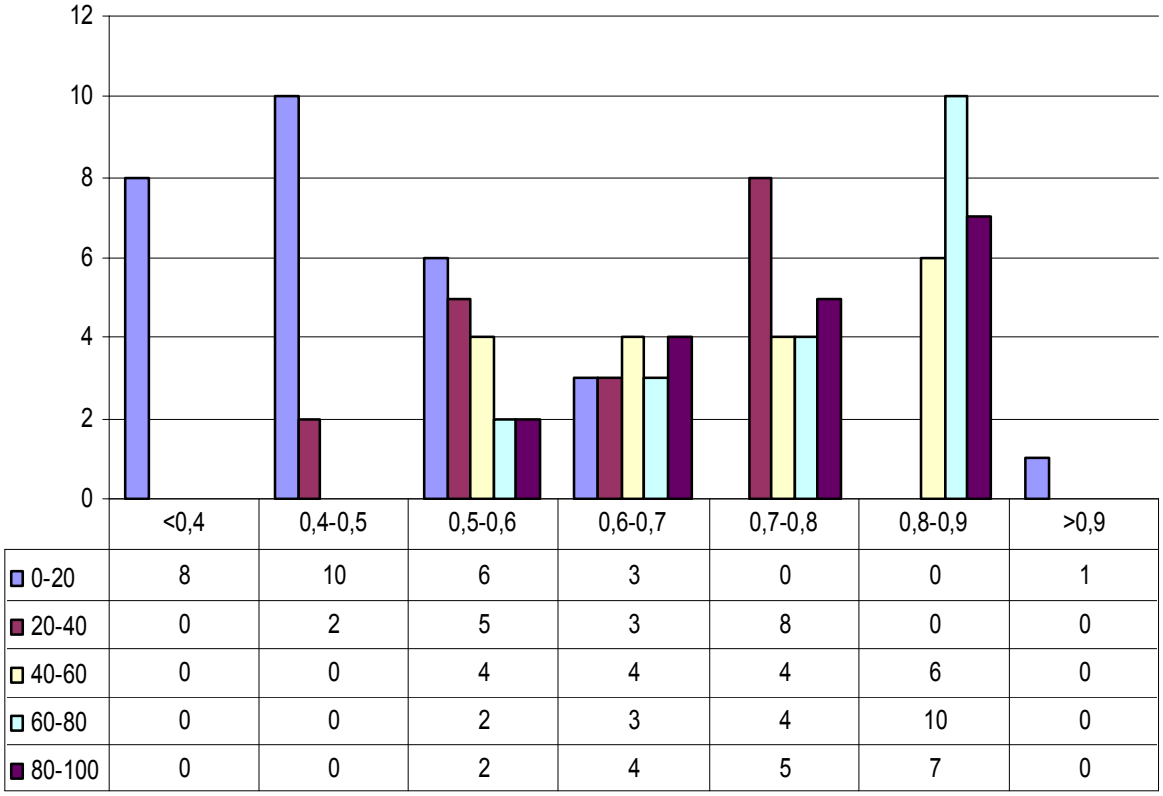


Рисунок В.3 – Гистограмма зависимости ОДП от температуры пропитки

Таблица В.11 – Вероятность попадания ранга температуры сушки в определенный ранг ОДП

Температура сушки, °С	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Суммарная вероятность, $P(A)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
80	0,05	0,04	0,09	0,01	0,06	0,01	0,00	0,26
100	0,03	0,08	0,10	0,16	0,15	0,22	0,01	0,74
Суммарная вероятность, $P(T)$	0,08	0,12	0,19	0,17	0,21	0,23	0,01	1,00

Таблица В.12 – Неопределенность попадания ранга температуры сушки в определенный ранг ОДП

Температура сушки, °C	Эмпирическая вероятность классов ОДП							$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9		
80	-0,21	-0,18	-0,31	-0,07	-0,24	-0,07	0,00	-0,50	0,03
100	-0,15	-0,29	-0,33	-0,42	-0,41	-0,48	-0,07	-0,32	0,06
$p(T)\times$ $\times\log(p(T))$	-0,29	-0,37	-0,45	-0,43	-0,47	-0,49	-0,07	–	–
$H(A/t_j)$	0,37	0,47	0,64	0,49	0,65	0,54	0,07	–	–

Рассчитав соответствующие показатели, в результате получим:

– $H(A) = 0,82$;

– $H(T) = 2,56$;

– $T(A,T) = 0,09$;

– коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A $K(A,B) = 0,033$.

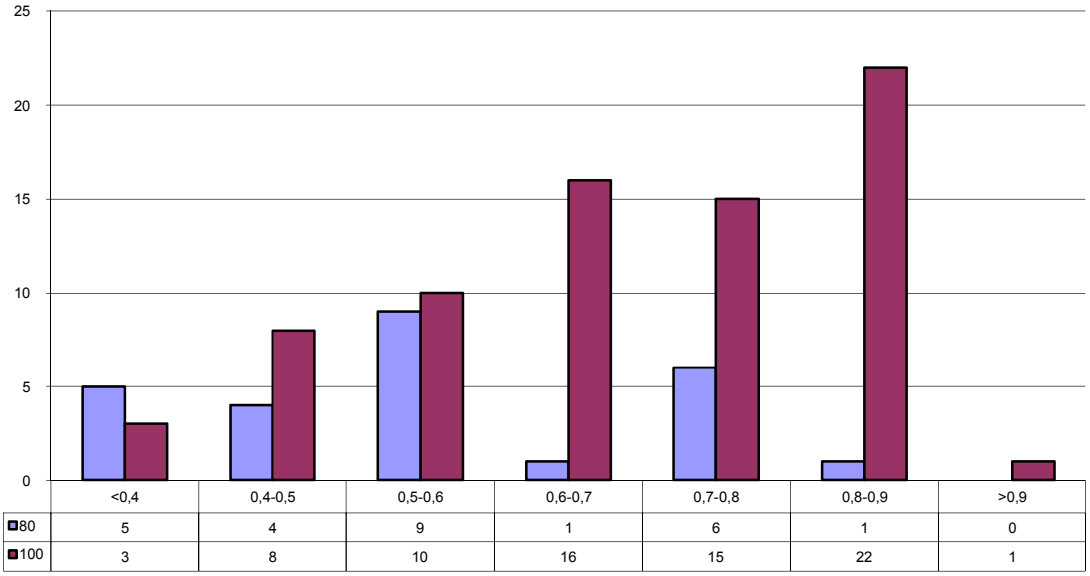


Рисунок В.4 – Гистограмма зависимости ОДП от температуры сушки

Таблица В.13 – Количество попаданий ранга времени сушки в определенный ранг ОДП

Время сушки, мин	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Итого
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
8	5	2	0	0	0	0	0	7
9	0	8	6	2	0	0	0	16
10	1	0	4	14	8	0	0	27
11	2	0	0	1	9	13	0	25
12	0	0	8	0	0	5	1	14
13	0	2	1	0	4	5	0	12
Итого	8	12	19	17	21	23	1	101

Таблица В.14 – Вероятность попадания ранга времени сушки в определенный ранг ОДП

Время сушки, мин	Эмпирическая вероятность классов ОДП							$P(A)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
8	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
9	0,00	0,08	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,16
10	0,01	0,00	0,04	0,14	0,08	0,00	0,00	0,27
11	0,02	0,00	0,00	0,01	0,09	0,13	0,00	0,25
12	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,05	0,01	0,14
13	0,00	0,02	0,01	0,00	0,04	0,05	0,00	0,12
Суммарная вероятность, $P(T)$	0,08	0,12	0,19	0,17	0,21	0,23	0,01	1,00

Таблица В.15 – Неопределенность попадания ранга времени сушки в определенный ранг ОДП

Время сушки, мин	Эмпирическая вероятность классов ОДП							$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9		
8	-0,21	-0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,27	0,03
9	0,00	-0,29	-0,24	-0,11	0,00	0,00	0,00	-0,42	0,06
10	-0,07	0,00	-0,18	-0,40	-0,29	0,00	0,00	-0,51	0,15
11	-0,11	0,00	0,00	-0,07	-0,31	-0,38	0,00	-0,50	0,10
12	0,00	0,00	-0,29	0,00	0,00	-0,21	-0,07	-0,40	0,16
13	0,00	-0,11	-0,07	0,00	-0,18	-0,21	0,00	-0,37	0,18
$p(T)\times$ $\times\log(p(T))$	-0,29	-0,37	-0,45	-0,43	-0,47	-0,49	-0,07	–	–
$H(A/t_j)$	0,39	0,51	0,78	0,57	0,79	0,81	0,07	–	–

В результате расчета было определено, что энтропия $H(A)$ = 2,46, энтропия $H(T)$ = 2,56, количество информации $T(A,T)$ = 0,68, коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A $K(A,B)$ = 0,171.

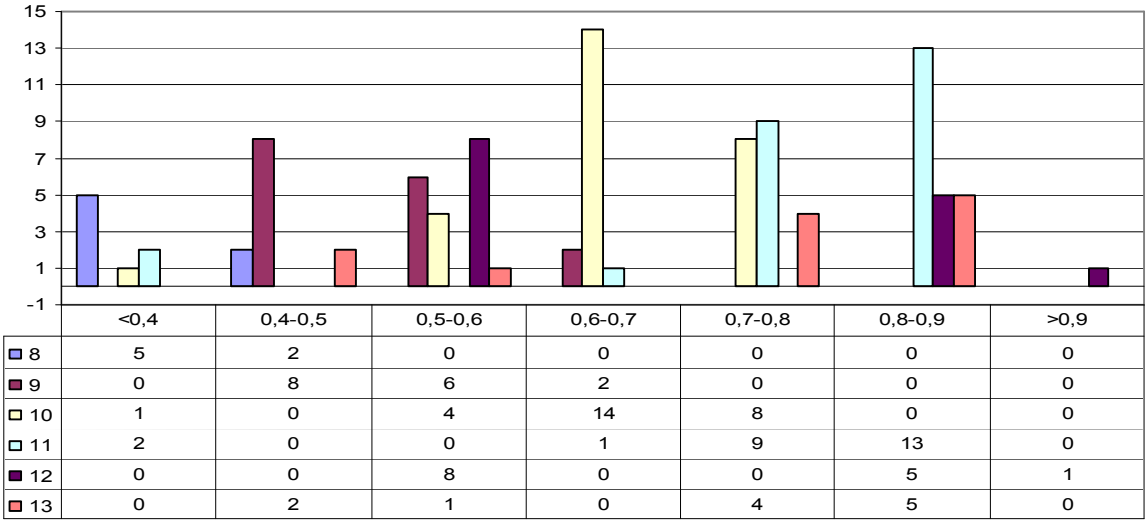


Рисунок В.5 – Гистограмма зависимости ОДП от времени сушки

Таблица В.16 – Количество попаданий ранга количества циклов создания вакуума с последующим восстановлением атмосферного давления в определенный ранг ОДП

Количество вакуумных циклов, шт	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Итого
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0	1	2	5	4	0	2	0	14
1	2	6	5	10	11	13	0	47
2	5	2	6	3	6	8	0	30
3	0	2	3	0	4	0	1	10
Итого	8	12	19	17	21	23	1	101

Таблица В.17 – Вероятность попадания ранга количества циклов создания вакуума с последующим восстановлением атмосферного давления в определенный ранг ОДП

Количество вакуумных циклов, шт	Эмпирическая вероятность классов ОДП							Суммарная вероятность, $P(A)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9	
0	0,01	0,02	0,05	0,04	0,00	0,02	0,00	0,14
1	0,02	0,06	0,05	0,10	0,11	0,13	0,00	0,47
2	0,05	0,02	0,06	0,03	0,06	0,08	0,00	0,30
3	0,00	0,02	0,03	0,00	0,04	0,00	0,01	0,10
Суммарная вероятность, $P(T)$	0,08	0,12	0,19	0,17	0,21	0,23	0,01	1,00

Таблица В.18 – Неопределенность попадания ранга количества циклов создания вакуума с последующим восстановлением атмосферного давления в определенный ранг ОДП

Количество вакуумных циклов, шт	Эмпирическая вероятность классов ОДП							$p(A)\times$ $\times\log(p(A))$	$J(A/t_j)$
	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	>0,9		
0	-0,07	-0,11	-0,21	-0,18	0,00	-0,11	0,00	-0,40	0,03
1	-0,11	-0,24	-0,21	-0,33	-0,35	-0,38	0,00	-0,51	0,07
2	-0,21	-0,11	-0,24	-0,15	-0,24	-0,29	0,00	-0,52	0,15
3	0,00	-0,11	-0,15	0,00	-0,18	0,00	-0,07	-0,33	0,11
$p(T)\cdot\log(p(T))$	-0,29	-0,37	-0,45	-0,43	-0,47	-0,49	-0,07	–	–
$H(A/t_j)$	0,39	0,58	0,82	0,67	0,77	0,78	0,07	–	–

Определяем:

– энтропию $H(A) = 1{,}76$;

– энтропию $H(T) = 2{,}56$;

– количество информации $T(A,T) = 0{,}37$;

– коэффициент эффективности передачи информации $K(A,B) = 0{,}103$.

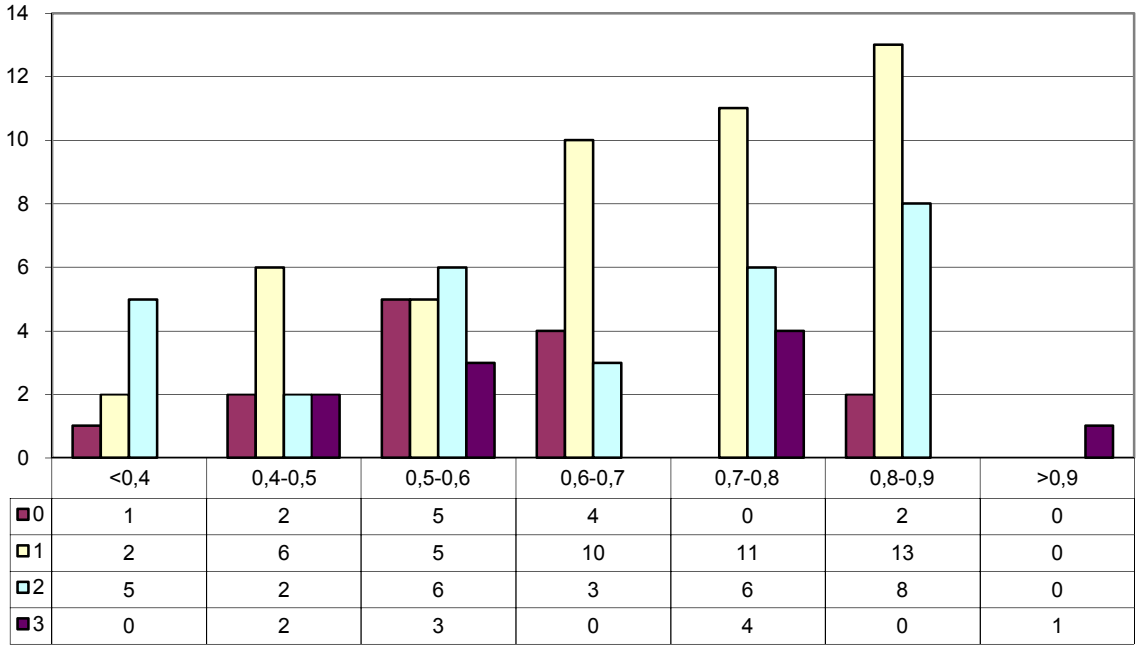


Рисунок В.6 – Гистограмма зависимости ОДП
от количества циклов создания вакуума

Приложение Г

Результаты прогнозирования остаточного ресурса электродвигателей

Таблица Г.1 – Прогноз остаточного ресурса электродвигателей, эксплуатируемых в растениеводстве

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнозируемый остаточный ресурс, ч
На открытом воздухе или под навесом	Пункты послеуборочной обработки зерна	Оборудование и установки по обработке зерна	АО2	0 – 34	6400
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
			АО2СХ	0 – 34	7000
				35 – 45	2800
				46 – 59	2200
				60 и более	1000
		Агрегаты для приготовления травяной муки типа АВМ	АО2	0 – 34	5900
				35 – 45	2100
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 600
			4А	0 – 34	5500
				35 – 45	2000
				46 – 59	1500
				60 и более	менее 550
			Д	0 – 34	5600
				35 – 45	2100
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 550
		Зерносушилки	АО2	0 – 34	6700
				35 – 45	2700
				46 – 59	2200

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнози-руемый остаточный ресурс, ч
				60 и более	1000
			4А	0 – 34	6000
				35 – 45	2400
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			Д	0 – 34	6100
				35 – 45	2500
				46 – 59	2100
				60 и более	менее 1000
Пыльные (влажность до 98 %, температура от -40 до +45 °С, запыленность до 240 г/м^3)	Мельницы, элеваторы, комбикормовые цеха, зерносклады	Транспортеры	АО2	0 – 34	6000
				35 – 45	2200
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 750
			4А	0 – 34	5400
				35 – 45	2000
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 700
			Д	0 – 34	5800
				35 – 45	2000
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 700
		Вентиляторы	АО2	0 – 34	8800
				35 – 45	3800
				46 – 59	2400
				60 и более	1500
			4А	0 – 34	8000
				35 – 45	3500
				46 – 59	2100
				60 и более	1300
			Д	0 – 34	8200
				35 – 45	3600
				46 – 59	2200
				60 и более	1400
		Зерноочистительные агрегаты	АО2	0 – 34	5800
				35 – 45	2200
				46 – 59	1700

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнози-руемый остаточный ресурс, ч
				60 и более	менее 600
			4А	0 – 34	5600
				35 – 45	2100
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 600
			Д	0 – 34	5700
				35 – 45	2300
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 600
		Зерносушилки	АО2	0 – 34	6600
				35 – 45	2700
				46 – 59	2200
				60 и более	1100
			4А	0 – 34	6000
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	1000
			Д	0 – 34	6100
				35 – 45	2600
				46 – 59	2100
				60 и более	1000
		Зернодробилки	АО2	0 – 34	5900
				35 – 45	2100
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 600
			4А	0 – 34	5400
				35 – 45	1900
				46 – 59	1400
				60 и более	менее 500
			Д	0 – 34	5400
				35 – 45	2000
				46 – 59	1500
				60 и более	менее 550

Таблица Г.2 – Прогноз остаточного ресурса электродвигателей, эксплуатируемых в животноводстве

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнозируемый остаточный ресурс, ч
Особо сырые (влажность превышает 98 %)	Кормоприготовительные цехи животноводческих ферм и комплексов	Дозаторы	АО2	0 – 34	6400
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
		Смесители	АО2	0 – 34	6300
				35 – 45	2400
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5700
				35 – 45	2200
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5800
				35 – 45	2300
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
		Транспортеры	АО2	0 – 34	6400
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнози-руемый ос-таточный ресурс, ч
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
		Измельчители кормов	АО2	0 – 34	6200
				35 – 45	2400
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5700
				35 – 45	2200
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5800
				35 – 45	2300
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
		Прессы	АО2	0 – 34	6300
				35 – 45	2400
				46 – 59	1900
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
	Доильные залы, молочные отделения	Молочные прессы	А02	0 – 34	6300
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнози-руемый ос-таточный ресурс, ч
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
			А02СХ	0 – 34	6800
				35 – 45	2800
				46 – 59	2300
				60 и более	1100
		Сепараторы	АО2	0 – 34	6400
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
			А02СХ	0 – 34	6900
				35 – 45	2900
				46 – 59	2400
				60 и более	1200
		Вакуум-насосы	АО2	0 – 34	6400
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнози-руемый ос-таточный ресурс, ч
			А02СХ	0 – 34	6900
				35 – 45	2900
				46 – 59	2400
				60 и более	1200
		Пастеризаторы	АО2	0 – 34	5800
				35 – 45	2200
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 600
			4А	0 – 34	5600
				35 – 45	2100
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 600
			Д	0 – 34	5700
				35 – 45	2300
				46 – 59	1600
				60 и более	менее 600
			А02СХ	0 – 34	6700
				35 – 45	2700
				46 – 59	2100
				60 и более	1000
	Насосные и моечные отделения молочных ферм	Насосы	АО2	0 – 34	6400
				35 – 45	2500
				46 – 59	2000
				60 и более	менее 1000
			4А	0 – 34	5800
				35 – 45	2250
				46 – 59	1700
				60 и более	менее 800
			Д	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
		Вентиляторы	АО2	0 – 34	8800
				35 – 45	3800
				46 – 59	2400
				60 и более	1500

Условия окружающей среды	Типы и назначение помещений	Перечень оборудования	Вид двигателя	Значение критерия $К_{ни}$, %	Прогнозируемый остаточный ресурс, ч
			4А	0 – 34	8000
				35 – 45	3500
				46 – 59	2100
				60 и более	1300
			Д	0 – 34	8200
				35 – 45	3600
				46 – 59	2200
				60 и более	1400
Особо сырые (влажность превышает 98 %, содержание аммиака от 2 до140 мг/м^3, сероводорода от 10 до 90 мг/м^3, углекислого газа от 0,03 до 0,88 мг/м^3)	Животноводческие помещения	Транспортеры уборки навоза	АО2СХ	0 – 34	5900
				35 – 45	2300
				46 – 59	1800
				60 и более	менее 800
		Насосы	АО2СХ	0 – 34	6500
				35 – 45	2700
				46 – 59	2100
				60 и более	1000
		Вентиляторы	АО2СХ	0 – 34	8200
				35 – 45	3600
				46 – 59	2400
				60 и более	1400

Приложение Д

Д.1 Применение информационно-логического анализа для случая с межвитковым замыканием

Таблица Д.1 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды первой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0,4-0,45	0	1	0	0	1	2
0,45-0,5	1	0	1	1	0	3
0,5-0,55	1	3	3	1	4	12
0,55-0,6	4	3	1	4	1	13
0,6-0,65	3	4	3	2	5	17
0,65-0,7	4	3	5	5	2	19
0,7-0,75	3	2	3	3	2	13
0,75-0,85	1	2	2	1	3	9
0,95-1,2	3	3	3	3	3	15
Итого	20	21	21	20	21	103

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0,4-0,45	0,000	0,500	0,000	0,000	0,500	0,019
0,45-0,5	0,333	0,000	0,333	0,333	0,000	0,029
0,5-0,55	0,083	0,250	0,250	0,083	0,333	0,117
0,55-0,6	0,308	0,231	0,077	0,308	0,077	0,126
0,6-0,65	0,176	0,235	0,176	0,118	0,294	0,165
0,65-0,7	0,211	0,158	0,263	0,263	0,105	0,184
0,7-0,75	0,231	0,154	0,231	0,231	0,154	0,126
0,75-0,8	0,111	0,222	0,222	0,111	0,333	0,087
1,05-1,1	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,146
$P(T)$	0,194	0,204	0,204	0,194	0,204	1,000

Продолжение таблицы Д.1

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/t_j)$
0,4-0,45	0,000	-0,500	0,000	0,000	-0,500	-0,110	-1,000	-1,322
0,45-0,5	-0,528	0,000	-0,528	-0,528	0,000	-0,149	-1,585	-0,737
0,5-0,55	-0,299	-0,500	-0,500	-0,299	-0,528	-0,361	-2,126	-0,196
0,55-0,6	-0,523	-0,488	-0,285	-0,523	-0,285	-0,377	-2,104	-0,218
0,6-0,65	-0,442	-0,491	-0,442	-0,363	-0,519	-0,429	-2,257	-0,065
0,65-0,7	-0,473	-0,420	-0,507	-0,507	-0,342	-0,450	-2,249	-0,072
0,7-0,75	-0,488	-0,415	-0,488	-0,488	-0,415	-0,377	-2,295	-0,026
0,75-0,8	-0,352	-0,482	-0,482	-0,352	-0,528	-0,307	-2,197	-0,124
1,05-1,1	0,000	-0,464	0,000	-0,464	-0,464	-0,405	-1,393	-0,928
$p(T)\cdot\log(p(T))$	-0,459	-0,468	-0,468	-0,459	-0,468			

Используя формулы (1.7) – (1.10), определяем:

- неопределенность явления (дефектность ЭД) – энтропию $H(A) = -2{,}322$;
- неопределенность фактора (гармоника спектра) – энтропию $H(B) = -2{,}965$;
- количество информации о дефекте, содержащееся в гармонике спектра напряженности ВМП двигателя $T(A,B) = -0{,}271$;
- коэффициент эффективности передачи информации гармонической составляющей спектра (фактором B) к явлению A $K(A,B) = 0{,}091$.

Таблица Д.2 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды третей гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0,05-0,1	2	3	3	3	2	13
0,1-0,15	5	5	4	6	6	26
0,15-0,2	3	3	5	3	3	17
0,2-0,25	4	5	3	3	4	19
0,25-0,3	4	1	2	3	1	11
0,3-0,35	1	3	1	3	3	11
0,35-0,4	2	1	2	0	1	6
Итого	21	21	20	21	20	103

Продолжение таблицы Д.2

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0,05-0,1	0,154	0,231	0,231	0,231	0,154	0,126
0,1-0,15	0,192	0,192	0,154	0,231	0,231	0,252
0,15-0,2	0,176	0,176	0,294	0,176	0,176	0,165
0,2-0,25	0,211	0,263	0,158	0,158	0,211	0,184
0,25-0,3	0,364	0,091	0,182	0,273	0,091	0,107
0,3-0,35	0,091	0,273	0,091	0,273	0,273	0,107
0,35-0,4	0,333	0,167	0,333	0,000	0,167	0,058
$P(A)$	0,204	0,204	0,194	0,204	0,194	1,000

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/b_j)$
0,05-0,1	-0,415	-0,488	-0,488	-0,488	-0,415	-0,377	-2,295	-0,026
0,1-0,15	-0,457	-0,457	-0,415	-0,488	-0,488	-0,501	-2,307	-0,015
0,15-0,2	-0,442	-0,442	-0,519	-0,442	-0,442	-0,429	-2,286	-0,036
0,2-0,25	-0,473	-0,507	-0,420	-0,420	-0,473	-0,450	-2,294	-0,027
0,25-0,3	-0,531	-0,314	-0,447	-0,511	-0,314	-0,345	-2,118	-0,203
0,3-0,35	-0,314	-0,511	-0,314	-0,511	-0,511	-0,345	-2,163	-0,159
0,35-0,4	-0,528	-0,431	-0,528	0,000	-0,431	-0,239	-1,918	-0,403
$p(A)\cdot\log(p(A))$	-0,468	-0,468	-0,459	-0,468	-0,459			

Аналогично предыдущему случаю, определяем:

$H(A) = -2{,}322$; $H(B) = -2{,}685$; $T(A,B) = -0{,}08$; $K(A,B) = 0{,}03$.

Таблица Д.3 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды пятой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0-0,05	5	3	4	4	1	17
0,05-0,1	8	12	9	12	16	57
0,1-0,15	5	3	6	2	2	18
0,15-0,2	3	3	2	3	2	13
Итого	21	21	21	21	21	105

Продолжение таблицы Д.3

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0-0,05	0,294	0,176	0,235	0,235	0,059	0,162
0,05-0,1	0,140	0,211	0,158	0,211	0,281	0,543
0,1-0,15	0,278	0,167	0,333	0,111	0,111	0,171
0,15-0,2	0,231	0,231	0,154	0,231	0,154	0,124
$P(B)$	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/b_j)$
0-0,05	-0,519	-0,442	-0,491	-0,491	-0,240	-0,425	-2,184	-0,138
0,05-0,1	-0,398	-0,473	-0,420	-0,473	-0,514	-0,478	-2,279	-0,043
0,1-0,15	-0,513	-0,431	-0,528	-0,352	-0,352	0,000	-2,177	-0,145
0,15-0,2	-0,488	-0,488	-0,415	-0,488	-0,415	0,000	-2,295	-0,026
$p(B)\cdot\log(p(B))$	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464			

Исходя из описанных в первом разделе выражений, найдем:

$H(A) = -2{,}322$; $H(B) = -0{,}904$; $T(A,B) = -0{,}074$; $K(A,B) = 0{,}082$.

Таблица Д.4 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды седьмой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0-0,05	15	15	15	15	16	76
0,05-0,1	5	6	5	6	4	26
0,1-0,15	1	0	1	0	1	3
Итого	21	21	21	21	21	105

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0-0,05	0,197	0,197	0,197	0,197	0,211	0,724
0,05-0,1	0,192	0,231	0,192	0,231	0,154	0,248
0,1-0,15	0,333	0,000	0,333	0,000	0,333	0,029
$P(T)$	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000

Продолжение таблицы Д.4

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/b_j)$
0-0,05	-0,462	-0,462	-0,462	-0,462	-0,473	-0,338	-2,321	0,000
0,05-0,1	-0,457	-0,488	-0,457	-0,488	-0,415	-0,499	-2,307	-0,015
0,1-0,15	-0,528	0,000	-0,528	0,000	-0,528	0,000	-1,585	-0,737
$p(B)\cdot\log(p(B))$	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464			

Используя формулы (1.7) – (1.10), определяем:

$H(A) = -2{,}322$; $H(B) = -0{,}936$; $T(A,B) = -0{,}025$; $K(A,B) = 0{,}03$.

Таблица Д.5 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды девятой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0-0,05	20	21	20	21	21	103
0,05-0,1	1	0	1	0	0	2
Итого	21	21	21	21	21	105

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0-0,05	0,194	0,204	0,194	0,204	0,204	0,981
0,05-0,1	0,500	0,000	0,500	0,000	0,000	0,019
$P(T)$	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/b_j)$
0-0,05	-0,459	-0,468	-0,459	-0,468	-0,468	-0,027	-2,322	0,000
0,05-0,1	-0,500	0,000	-0,500	0,000	0,000	-0,109	-1,000	-1,322
$p(B)\cdot\log(p(B))$	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464	-0,136		

Аналогично предыдущему случаю, найдем:

$H(A) = -2{,}322$; $H(B) = -0{,}136$; $T(A,B) = -0{,}026$; $K(A,B) = 0{,}188$.

Д.2 Применение информационно-логического анализа для случая с межфазным замыканием

Таблица Д.6 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды первой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0,4-0,45	0	1	1	0	0	2
0,45-0,5	2	3	3	1	1	10
0,5-0,55	3	0	1	3	2	9
0,55-0,6	0	2	0	4	4	10
0,6-0,65	4	5	4	2	4	19
0,65-0,7	1	1	3	2	3	10
0,7-0,75	1	1	3	4	1	10
0,75-0,8	1	3	1	1	1	7
0,85-0,9	0	0	1	0	1	2
0,9-0,95	1	1	0	1	0	3
0,95-1	1	0	1	0	0	2
1-1,05	2	1	1	1	1	6
1,1-1,15	0	0	2	2	1	5
1,15-1,2	1	1	0	0	1	3
Итого	17	19	21	21	20	98

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0,4-0,45	0,000	0,500	0,500	0,000	0,000	0,020
0,45-0,5	0,200	0,300	0,300	0,100	0,100	0,102
0,5-0,55	0,333	0,000	0,111	0,333	0,222	0,092
0,55-0,6	0,000	0,200	0,000	0,400	0,400	0,102
0,6-0,65	0,211	0,263	0,211	0,105	0,211	0,194
0,65-0,7	0,100	0,100	0,300	0,200	0,300	0,102
0,7-0,75	0,100	0,100	0,300	0,400	0,100	0,102
0,75-0,8	0,143	0,429	0,143	0,143	0,143	0,071

Продолжение таблицы Д.6

0,85-0,9	0,000	0,000	0,500	0,000	0,500	0,020
0,9-0,95	0,333	0,333	0,000	0,333	0,000	0,031
0,95-1	0,500	0,000	0,500	0,000	0,000	0,020
1-1,05	0,333	0,167	0,167	0,167	0,167	0,061
1,1-1,15	0,000	0,000	0,400	0,400	0,200	0,051
1,15-1,2	0,333	0,333	0,000	0,000	0,333	0,031
$P(B)$	0,173	0,194	0,214	0,214	0,204	1,000

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/b_j)$
0-0,45	0,000	-0,500	-0,500	0,000	0,000	-0,115	-1,000	-1,318
0,45-0,5	-0,464	-0,521	-0,521	-0,332	-0,332	-0,336	-2,171	-0,147
0,5-0,55	-0,528	0,000	-0,352	-0,528	-0,482	-0,316	-1,891	-0,427
0,55-0,6	0,000	-0,464	0,000	-0,529	-0,529	-0,336	-1,522	-0,796
0,6-0,65	-0,473	-0,507	-0,473	-0,342	-0,473	-0,459	-2,268	-0,049
0,65-0,7	-0,332	-0,332	-0,521	-0,464	-0,521	-0,336	-2,171	-0,147
0,7-0,75	-0,332	-0,332	-0,521	-0,529	-0,332	-0,336	-2,046	-0,271
0,75-0,8	-0,401	-0,524	-0,401	-0,401	-0,401	-0,272	-2,128	-0,190
0,85-0,9	0,000	0,000	-0,500	0,000	-0,500	-0,115	-1,000	-1,318
0,9-0,95	-0,528	-0,528	0,000	-0,528	0,000	-0,154	-1,585	-0,733
0,95-1	-0,500	0,000	-0,500	0,000	0,000	-0,115	-1,000	-1,318
1-1,05	-0,528	-0,431	-0,431	-0,431	-0,431	-0,247	-2,252	-0,066
1,1-1,15	0,000	0,000	-0,529	-0,529	-0,464	-0,219	-1,522	-0,796
1,15-1,5	-0,528	-0,528	0,000	0,000	-0,528	-0,154	-1,585	-0,733
$p(B)\cdot\log(p(B))$	-0,438	-0,459	-0,476	-0,476	-0,468			

Используя формулы (1.7) – (1.10), определяем:

– энтропию $H(A) = -2{,}318$;

– энтропию $H(B) = -3{,}509$;

– количество информации $T(A,B) = -0{,}371$;

– коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A $K(A,B) = 0{,}106$.

Таблица Д.7 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды третей гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0,05-0,1	4	6	4	3	5	22
0,1-0,15	4	3	3	5	2	17
0,15-0,2	1	1	4	2	3	11
0,2-0,25	3	1	1	1	4	10
0,25-0,3	1	5	3	6	2	17
0,3-0,35	2	1	3	1	3	10
0,35-0,4	1	2	2	1	1	7
0,4-0,45	1	1	1	2	1	6
0,5-0,55	1	1	0	0	0	2
Итого	18	21	21	21	21	102

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0,05-0,1	0,182	0,273	0,182	0,136	0,227	0,216
0,1-0,15	0,235	0,176	0,176	0,294	0,118	0,167
0,15-0,2	0,091	0,091	0,364	0,182	0,273	0,108
0,2-0,25	0,300	0,100	0,100	0,100	0,400	0,098
0,25-0,3	0,059	0,294	0,176	0,353	0,118	0,167
0,3-0,35	0,200	0,100	0,300	0,100	0,300	0,098
0,35-0,4	0,143	0,286	0,286	0,143	0,143	0,069
0,4-0,45	0,167	0,167	0,167	0,333	0,167	0,059
0,5-0,55	0,500	0,500	0,000	0,000	0,000	0,020
$P(T)$	0,176	0,206	0,206	0,206	0,206	1,000

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/t_j)$
0,05-0,1	-0,447	-0,511	-0,447	-0,392	-0,486	-0,477	-2,283	-0,036
0,1-0,15	-0,491	-0,442	-0,442	-0,519	-0,363	-0,431	-2,257	-0,062
0,15-0,2	-0,314	-0,314	-0,531	-0,447	-0,511	-0,346	-2,118	-0,201
0,2-0,25	-0,521	-0,332	-0,332	-0,332	-0,529	-0,328	-2,046	-0,273

Продолжение таблицы Д.7

0,25-0,3	-0,240	-0,519	-0,442	-0,530	-0,363	-0,431	-2,095	-0,224
0,3-0,35	-0,464	-0,332	-0,521	-0,332	-0,521	-0,328	-2,171	-0,148
0,35-0,4	-0,401	-0,516	-0,516	-0,401	-0,401	-0,265	-2,236	-0,083
0,4-0,45	-0,431	-0,431	-0,431	-0,528	-0,431	-0,240	-2,252	-0,068
0,5-0,55	-0,500	-0,500	0,000	0,000	0,000	-0,111	-1,000	-1,319
$p(T)\cdot\log(p(T))$	-0,442	-0,469	-0,469	-0,469	-0,469			

$H(A) = -2{,}319$; $H(B) = -2{,}959$; $T(A,B) = -0{,}154$; $K(A,B) = 0{,}052$.

Таблица Д.8 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды пятой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0-0,05	3	3	2	4	3	15
0,05-0,1	10	10	11	10	11	52
0,1-0,15	6	7	7	4	6	30
0,15-0,2	1	1	1	3	1	7
Итого	20	21	21	21	21	104

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0-0,05	0,200	0,200	0,133	0,267	0,200	0,144
0,05-0,1	0,192	0,192	0,212	0,192	0,212	0,500
0,1-0,15	0,200	0,233	0,233	0,133	0,200	0,288
0,15-0,2	0,143	0,143	0,143	0,429	0,143	0,067
$P(T)$	0,192	0,202	0,202	0,202	0,202	1,000

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/t_j)$
0-0,05	-0,464	-0,464	-0,388	-0,509	-0,464	-0,403	-2,289	-0,032
0,05-0,1	-0,457	-0,457	-0,474	-0,457	-0,474	-0,500	-2,320	-0,001
0,1-0,15	-0,464	-0,490	-0,490	-0,388	-0,464	-0,517	-2,296	-0,026
0,15-0,2	-0,401	-0,401	-0,401	-0,524	-0,401	-0,262	-2,128	-0,194
$p(T)\cdot\log(p(T))$	-0,457	-0,466	-0,466	-0,466	-0,466			

$H(A) = -2{,}322$; $H(B) = -1{,}682$; $T(A,B) = -0{,}026$; $K(A,B) = 0{,}015$.

Таблица Д.9 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды седьмой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0-0,05	13	15	15	15	14	72
0,05-0,1	8	4	6	5	6	29
0,1-0,15	0	2	0	1	1	4
Итого	21	21	21	21	21	105

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0-0,05	0,181	0,208	0,208	0,208	0,194	0,686
0,05-0,1	0,276	0,138	0,207	0,172	0,207	0,276
0,1-0,15	0,000	0,500	0,000	0,250	0,250	0,038
$P(T)$	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/t_j)$
0-0,05	-0,446	-0,471	-0,471	-0,471	-0,459	-0,373	-2,320	-0,002
0,05-0,1	-0,513	-0,394	-0,470	-0,437	-0,470	-0,513	-2,285	-0,037
0,1-0,15	0,000	-0,500	0,000	-0,500	-0,500	-0,180	-1,500	-0,822
$p(T)\cdot\log(p(T))$	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464			

$H(A) = -2{,}322$; $H(B) = -1{,}066$; $T(A,B) = -0{,}043$; $K(A,B) = 0{,}041$.

Таблица Д.10 – Зависимость текущего состояния электродвигателя от амплитуды девятой гармоники спектра напряженности его внешнего магнитного поля

	0	25	50	75	100	Всего
0-0,05	20	20	21	21	20	102
0,05-0,1	1	1	0	0	1	3
Итого	21	21	21	21	21	105

	0	25	50	75	100	$P(b)$
0-0,05	0,196	0,196	0,206	0,206	0,196	0,971
0,05-0,1	0,333	0,333	0,000	0,000	0,333	0,029
$P(T)$	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000

Продолжение таблицы Д.10

	0	25	50	75	100	$p(b)\cdot\log(p(b))$	$H(A/b_j)$	$J(A/t_j)$
0-0,05	-0,461	-0,461	-0,469	-0,469	-0,461	-0,041	-2,322	0,000
0,05-0,1	-0,528	-0,528	0,000	0,000	-0,528	-0,147	-1,585	-0,737
$p(T)\cdot\log(p(T))$	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464	-0,464			

$H(A) = -\ 2{,}322$; $H(B) = -\ 0{,}187$; $T(A,B) = -\ 0{,}021$; $K(A,B) = 0{,}115$.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1 ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ 19

1.1 Структура парка электрических двигателей, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственного производства 19

1.2 Анализ факторов, влияющих на интенсивность протекания процессов старения и восстановления изоляции двигателей 21

1.2.1 Причины повреждений изоляции электрических двигателей и статистика выходов их из строя 22

1.2.2 Методы и технические средства восстановления работоспособности электродвигателей в процессе эксплуатации и ремонта 28

1.3 Состав и основные элементы предлагаемой системы повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве 35

1.4 Количественная оценка степени влияния воздействующих факторов на надежность электрических двигателей 44

1.4.1 Анализ методов описания неопределенностей в задачах мониторинга сложных процессов 45

1.4.2 Математическое моделирование в условиях нечеткой логики 46

1.4.3 Использование информационно-логического анализа при изучении влияния различных факторов на срок службы двигателя 49

1.5 Основные результаты и выводы по разделу 56

2 МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ 59

2.1 Современные методы диагностики электрических двигателей, используемых в сельском хозяйстве 59

2.2 Теоретическое обоснование диагностики электродвигателей на основе зависимости гармонического состава напряженности их внешнего магнитного поля от степени развития дефектов 62

2.2.1 Исследование природы и источников внешнего магнитного поля электрических двигателей 62

2.2.2 Анализ проявления различных дефектов электродвигателя в спектре напряженности его внешнего магнитного поля 66
2.2.3 Моделирование внешнего магнитного поля электрического двигателя при витковых и фазных замыканиях 76
2.3 Экспериментальные исследования зависимости параметров магнитного поля электродвигателя от степени развития дефектов 80
2.4 Метод диагностики электрических двигателей на основе анализа спектра напряженности их внешнего магнитного поля..... 91
2.5 Система технических средств диагностики на основе измерения параметров волновых затухающих колебаний в обмотке двигателя..... 95
2.5.1 Теоретические исследования влияния конструктивных и внешних воздействующих факторов на параметры волновых затухающих колебаний в обмотке электродвигателя 97
2.5.2 Метод оценки технического состояния изоляции электрических двигателей на основе анализа параметров волновых затухающих колебаний в обмотке..... 114
2.5.3 Экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров изоляции на параметры схемы замещения двигателей..... 119
2.6 Выбор и обоснование показателей эффективности технологических процессов пропитки и сушки изоляции электрических двигателей 122
2.7 Основные результаты и выводы по разделу 126
3 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗОЛЯЦИИ..... 129
3.1 Теоретические исследования процессов переноса энергии и массы вещества, протекающих в твердых капиллярно-пористых телах, и обоснование принципов их интенсификации 129
3.1.1 Анализ факторов, влияющих на качество восстановленной изоляции обмоток двигателей в ходе обслуживания и ремонта 133
3.1.2 Математическое описание процесса разрушения связующего обмоток электрических двигателей 137

3.1.3 Повышение эффективности пропитки обмоток электродвигателей посредством интенсивного изменения давления 146
3.1.4 Математическое моделирование процесса массопереноса в теле обмотки электродвигателя при скоростном вакуумировании 152
3.1.5 Анализ изменения свойств изоляции обмоток статоров электродвигателей в различных условиях пленкообразования 161
3.2 Экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса в обмотках электрических двигателей при восстановлении изоляции 165
3.2.1 Комплекс экспериментов по пропитке и сушке изоляции электродвигателей различными методами 168
3.2.2 Результаты экспериментальных исследований процессов пропитки и сушки скоростным термовакуумным методом 173
3.2.3 Динамика изменения обобщенного диагностического параметра при восстановлении изоляции электрических двигателей 178
3.2.4 Анализ режимов функционирования технологических установок по пропитке и сушке изоляции электродвигателей 182
3.3 Основные результаты и выводы по разделу 189
4 ЭЛЕКТРОТЕРМОВАКУУМНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОПИТКИ И СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ 192
4.1 Стационарная и мобильная установки термовакуумного разрушения связующего, пропитки и сушки обмоток ЭД 194
4.2 Система информационно-программного сопровождения электротермовакуумной технологии восстановления изоляции электрических двигателей 200
4.2.1 Схема автоматизации работы технологической установки разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции двигателей 203
4.2.2 Выбор управляющих воздействий на процессы разрушения связующего, пропитки и сушки изоляции 207
4.3 Оптимизация параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей 209
4.3.1 Общий подход к оптимизации параметров процесса восстановления изоляции электродвигателей 210

4.3.2 Постановка и алгоритм решения задачи оптимизации параметров процесса пропитки и сушки изоляции двигателей 211
4.3.3 Представление технологического процесса восстановления изоляции обмоток в пространственной модели оптимизации 216
4.3.4 Методики оптимизации параметров технологического процесса восстановления изоляции электродвигателей 221
4.4 Основные результаты и выводы по разделу 238
5 СИТУАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ ДИАГНОСТИКИ 240
5.1 Анализ методов планирования работ по ремонту электрических двигателей на предприятиях АПК 241
5.2 Исследование системы организации ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве как системы их массового обслуживания 246
5.2.1 Анализ систем с неограниченным потоком требований при ремонте электрических двигателей сторонними организациями 257
5.2.2 Показатели функционирования хозяйства при собственной системе ремонта отказавших электродвигателей 261
5.3 Оптимизация параметров системы организации ремонта электрических двигателей в сельском хозяйстве 278
5.4 Прогнозирование технического состояния электрических двигателей, эксплуатирующихся в условиях агропромышленного комплекса 284
5.4.1 Разработка экспертной системы прогнозирования наработки до очередного диагностического контроля электродвигателей 285
5.4.2 Определение логических зависимостей параметров спектра напряженности внешнего магнитного поля электрического двигателя от степени развития различных дефектов 287
5.4.3 Количественная оценка наработки до очередного диагностического контроля двигателя с учетом влияния условий эксплуатации 290
5.5 Основные результаты и выводы по разделу 301
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 304
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 307
ПРИЛОЖЕНИЯ 351