

На правах рукописи

**Герцен Николай Теодорович**

**АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ  
ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Специальность 05.20.02. – Электрооборудование и  
электротехнологии в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул 2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор  
Хомутов Олег Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Горелов Валерий Павлович

кандидат технических наук, доцент  
Меновщиков Юрий Александрович

Ведущая организация: ГОУ «Алтайский аграрный государственный университет»

Защита состоится «6» ноября 2007 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д212.004.02 в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Адрес: 650038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

Факс: 8-(385-2)-26-09-17

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

<http://www.astu.alt.ru>; E-mail: [ntsc@desert.secna.ru](mailto:ntsc@desert.secna.ru)

Автореферат разослан 6 октября 2007 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета



Л.В.Куликова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Дальнейшее развитие сельского хозяйства, и это очевидно, немыслимо без широкого использования асинхронных двигателей (АД) в качестве основного вида привода различных технологических машин и механизмов. Результаты многих исследований и их анализ показывают, что выход АД из строя наносит значительный ущерб, связанный не столько с ремонтом и заменой АД, сколько с простоем технологического оборудования, порчей сырья, нарушением технологических процессов, что приводит в конечном итоге к ущербу и убыткам от недополучения сельхозпродукции.

В сельскохозяйственном производстве существуют различные условия эксплуатации АД, следовательно, срок службы изоляции во многом зависит от условий окружающей среды и условий эксплуатации. Согласно статистике отказов АД, наибольшее число выходов их из строя связано с повреждением изоляции обмотки статора, что свидетельствует о наибольшей уязвимости именно этого узла.

Таким образом, диагностика и контроль состояния изоляции важная и ответственная задача профилактики АД. Эффективные средства и методы диагностики состояния изоляции могли бы в значительной степени решить проблему эксплуатационной надежности. Однако, даже имея в распоряжении высококачественные изоляционные и пропиточные материалы, необходимо вести профилактический контроль показателей изоляции во время эксплуатации АД в целях предотвращения преждевременного выхода из его строя из-за нарушения межвитковой или корпусной изоляции. Зная начальные значения показателей изоляции, отражающие по сути её качество, скорость ухудшения её характеристик в результате воздействия негативных факторов специфичных для сельхозпроизводства, можно осуществлять прогноз её состояния на перспективу. В настоящей работе предлагается на основе комплекса теоретических исследований осуществлять техническую диагностику изоляции электродвигателей в процессе эксплуатации, что делает работу актуальной с точки зрения снижения ущербов, связанных с выходом их строя.

**Целью настоящей диссертационной работы является** теоретическое обоснование эффективности разработанной методики и технических средств акустической диагностики изоляции обмоток АД в процессе его эксплуатации.

**Объектом исследований** является процесс взаимодействия проводников обмотки электродвигателя, вызывающий излучение акустических волн, по параметрам которых становится возможным определение степени старения изоляции.

**Предметом исследований** является получение новых закономерностей, описывающих связь амплитуды акустических шумов, порождаемых микроперемещениями проводников обмотки со степенью старения изоляции.

**Методы исследований.** Для достижения объявленной цели использовались основные положения теорий электромагнетизма, волновых и колебательных процессов, применялось математическое моделирование.

**Основными задачами исследований являются:**

- анализ влияния механических напряжений на надёжность изоляции обмоток АД в условиях сельхозпроизводства с целью возможности контроля её физико-механических характеристик акустическими волнами;

- выявление связей показателя  $E$  с коэффициентом затухания волны  $\alpha$  и степенью старения изоляции, позволяющих разработать математическую модель процесса распространения акустической волны, порождённой магнитным взаимодействием проводников обмотки статора АД.

- получение экспериментальных данных по затуханию акустических волн в изоляции, которые позволили бы рассматривать показатель  $E$  как диагностический параметр, который характеризует степень её старения.

- расчет воздействия электромагнитных полей, создаваемых током в проводниках обмотки с целью определения степени отрицательного влияния магнитострикционного и электродинамического эффекта на получение полезной диагностической информации;

- разработка технических средств диагностики старения полимерной изоляции, позволяющих проводить её контроль в процессе эксплуатации АД.

**Научная новизна** состоит в:

- обосновании возможности оценки степени старения изоляции с помощью измерения акустических шумов;

- построении математической модели взаимодействия обмоток и акустической волны, генерируемой её деформацией;

- построении модели изоляционной конструкции паза АД, в которой армирующими элементами являются проводники обмотки, а связующей средой – полимерная изоляция;

- разработке методики акустической диагностики изоляции на основе предложенного диагностического параметра степени её старения.

**Практическая ценность работы.** Предложенный метод акустического контроля позволяет оценивать степень старения изоляции обмоток АД в процессе их эксплуатации.

Разработанные технические средства позволяют производить измерения физико-механических характеристик изоляции АД на объектах сельскохозяйственного производства техническому персоналу без транспортировки АД в специализированные ремонтные предприятия и диагностические лаборатории.

Разработанная методика позволяет осуществлять прогнозирование состояния изоляции. Таким образом, существует возможность предотвращения внезапного выхода из строя АД, тем самым, уменьшая вероятность остановки технологического процесса, снижая порчу сырья и недовыпуск сельхозпродукции.

**Внедрение результатов работы.** Основные результаты исследований использованы и внедрены в ООО «Электра», занимающееся ремонтом электродвигателей для сельскохозяйственного производства, в ГКУП «Колос» с. Ситниково, ООО «Зерновое», ООО «Восход» с. Нижнечуманка, ООО «Вань-Юань-Плотава» Баевского района Алтайского края.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на энергетическом факультете Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова при изучении дисциплины «Электротехнологические установки сельскохозяйственного производства».

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственной научно-технической программой по единому заказу-наряду (код 55.22.19) на период до 2008 года «Разработка общих и частных методов диагностирования полимерной изоляции, элементов теории ультразвуковой спектроскопии и волновых затухающих колебаний» и научным направлением «Повышение эксплуатационной надёжности электрооборудования в сельскохозяйственном производстве».

**Апробация работы.** Основные положения работы доложены, обсуждены и одобрены на всероссийской научно-технической конференции «Моделирование физических процессов и систем (Н. Новгород 2003) и на ежегодных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ.

На защиту выносятся:

- математическая модель процесса распространения акустической волны в полимерной изоляции АД, порождаемым взаимодействием проводников с током.

- диагностический параметр  $E$  степени старения изоляции;

- технические средства диагностики изоляции.

Публикации. По результатам проведённых исследований опубликовано 8 работ, в том числе 1 учебное пособие, 1 монография.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, приложений, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования, изложена на 143 страницах, содержит 88 рисунков, 13 таблиц.

Выражаю искреннюю благодарность за оказание помощи в работе над диссертацией научному руководителю д.т.н. проф. О.И.Хомутову и к.т.н. Г.В.Суханкину.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы её цель и задачи. Описаны текущее состояние вопроса в рассматриваемой области и существующие наработки. Изложены основные результаты работы, указана её научная новизна, практическая значимость. Приведены сведения о практической реализации результатов.

В первой главе приведён анализ диагностики состояния полимерной изоляции обмоток АД. Приведены общие сведения об особенностях эксплуатации АД в агропромышленном комплексе (АПК) и её влияние на физико-механические свойства изоляции. Показаны статистические данные срока жизни изоляции и причины выхода её из строя. Рассмотрены наиболее перспективные методы контроля изоляции.

В процессе эксплуатации, изоляция электрических машин длительное время находится под рабочим напряжением и постоянно испытывает воздействия теплового характера, следовательно, ухудшаются её физико-механические показатели и снижается предел прочности. Из перечисленных выше факторов, в большинстве случаев, доминирует температура и как следствие – тепловое старение изоляции.

Модуль упругости  $E$  полимерных материалов является мерой их жёсткости. Он входит в формулу расчётов внутренних напряжений изоляции и существенным образом влияет на её внутренние напряжения.

В процессе теплового старения изоляции модуль её упругости в стеклообразном состоянии увеличивается, что подтверждается литературными и экспериментальными данными. Это значит, что снижается податливость (эластичность) полимера, что может повлечь за собой повышение склонности к образованию в нём трещин. Наиболее интенсивно этот процесс происходит в первые 1000–2000 ч. старения. Существующие методы диагностики выявляют частично распределенные дефекты (увлажнение, расслоение), но не обнаруживают сосредоточенные и наиболее опасные дефекты. Измерение сопротивле-

ния позволяет выявить местные грубые дефекты. Измерение  $\text{tg } \delta$  и интенсивности ЧР в эксплуатации полезно производить систематически для накопления статистического материала, иногда в комплексе с другими измерениями позволяют выявить некоторые дефекты, а в некоторых случаях определить приближение срока ремонта машины. В связи с вышеизложенным показатель  $E$  может служить показателем степени старения полимерной изоляции.

Во второй главе показана функциональная связь между коэффициентом поглощения акустической волны и модулем упругости полимерного материала, возможность контроля этого показателя с помощью технических устройств.

В процессе воздействия тепла на изоляцию обмоток статора АД, что имеет место при его эксплуатации, модуль упругости  $E$  полимерной изоляции возрастает на несколько порядков. Следовательно, увеличение упругих характеристик изоляции снижает коэффициент поглощения акустической волны. Таким образом, тепловое старение изоляции приводит к увеличению амплитуды акустического шума, по величине изменения которой можно судить о степени старения изоляции электродвигателя.

Коэффициент поглощения определяется из выражения:

$$\alpha = \frac{1}{E\lambda^2} (2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + \sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)})), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $\lambda$  – длина волны,  $c$  – скорость звука в соответствующей среде,  $\rho$  – плотность изоляции, в которой распространяется звук.

Соответствующий формуле (1) график показан на рис.1.

Чувствительный элемент, используемый в качестве приёмника акустических волн с характеристическим акустическим импедансом  $z_l = \rho_l c_l$  нагруженной на две среды с входными импедансами  $Z_0$  и  $Z_2$  представлен на рис. 2.

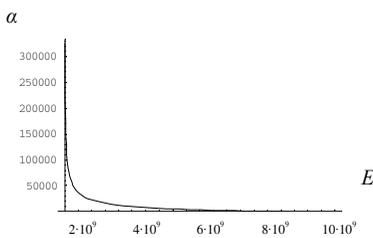


Рис. 1. Связь между затуханием акустической волны и упругостью изоляции

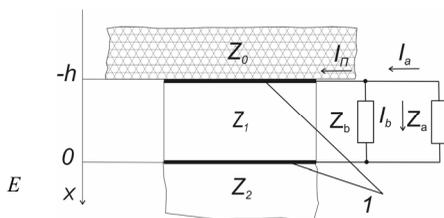


Рис. 2. Упрощенная схема для расчёта электроакустического тракта:  $Z_0$  – импеданс изоляции,  $Z_2$  – импеданс демпфера,  $Z_l$  – импеданс приёмника, 1 – электроды,  $Z_b$  – выходное сопротивление приёмника волн,  $Z_a$  – входное сопротивление электрической цепи

Подключение приёмников показано в соответствии с рис. 3. При этом имеется ввиду, что генерация акустического сигнала происходит не в результате вращения ротора АД, а порождается акустической эмиссией в самой изоляции. Акустическая эмиссия имеет место в результате прохождения импульсов тока в обмотке статора АД.

Пьезопластина толщиной  $h_1$  считается бесконечно протяжённой в направлении, перпендикулярном  $x$ , так что влияниями краёв пластины можно пренебречь. Пьезодатчик подключён к электрической цепи, которая обладает некоторым входным сопротивлением  $Z_a$ . Задача о приёме акустических волн сводится к расчёту эквивалентной электрической цепи, изображённой на рис. 4.

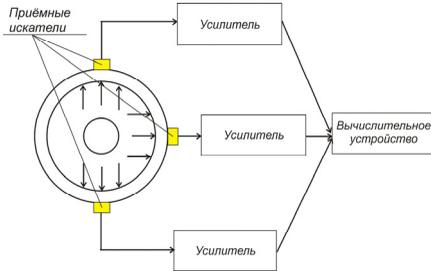


Рис. 3. Подключение приёмников для улавливания акустических шумов

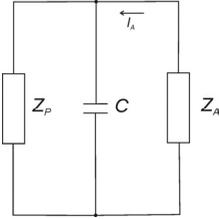


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения

Из протяжённой среды с характеристическим импедансом  $z = \rho c$  падает волна с акустическим напряжением  $T$  на систему тонких слоёв и, пройдя её, достигает пьезоприёмника. Решается подобная задача с помощью теории взаимности, построенной на системе аналогий: акустическое давление–электрическое напряжение, колебательная скорость–электрический ток. В результате получаем следующее выражение для падения напряжения  $U$  на входном сопротивлении  $z_a$ :

$$U = T \frac{2eS}{h_1 z_1} z_a B F_1 G, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь пьезопластины,  $e$  – пьезоконстанта,  $B = \frac{1/z_a}{1/z_a - j\omega C}$ ,

$$F_1 = \frac{\zeta_1 / \zeta_3}{1 + jg(1 + z_a / z_b) FB}, \quad g = \frac{e^2}{\epsilon_0 \epsilon h_1 \omega z_1} = \frac{\beta^2 f_0}{\pi f}, \quad f_0 - \text{частота, при которой толщина}$$

пластины равна половине длине волны,  $\beta$  – коэффициент электромеханической связи,

$$F = \frac{\zeta_1 + \zeta_2}{\zeta_3}, \quad \zeta_2 = 1 - \cos k_1 h_1 + j \frac{Z_2}{z_1} \sin k_1 h_1, \quad \zeta_1 = 1 - \cos k_1 h_1 - j \frac{Z_0}{z_1} \sin k_1 h_1,$$

$$\zeta_3 = \frac{Z_2 - Z_0}{z_1} \cos k_1 h_1 - j \left(1 - \frac{Z_2 Z_0}{z_1^2}\right) \sin k_1 h_1, \quad k_1 - \text{волновое число.}$$

Множитель,  $G$  учитывающий прохождение акустической волны через слой от второго до  $n$ -го (номер 1 присвоен пьезопластинке) имеет вид:

$$G = \prod_{i=2}^n \left( \cos k_i h_i - \frac{Z_{i+1}}{z_i} \sin k_i h_i \right),$$

где  $h_i, k_i, z_i = \rho_i c_i$  – толщина, волновое число и характеристический импеданс слоя  $i$ ,  $Z_{i+1}$  – входной импеданс следующего слоя.

В третьей главе показано, что волновое уравнение для полимерной изоляции записывается путем использования второго закона Ньютона к элементарному объему  $dx dy dz$  твердого тела. Таким образом, уравнение распространения волн в упругой полимерной среде:

$$p \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \mu \nabla u_x; \quad p \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \mu \nabla u_y,$$

где  $p$  – плотность изоляции,  $u$  – акустическое напряжение,  $\varepsilon$  – деформация,  $\lambda$  и  $\mu$  – упругие постоянные,  $\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа.

В экспоненциальной форме уравнение волны

$$\dot{\phi} = A e^{j(kx - \omega t)},$$

где  $A$  – амплитуда волны,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $f$  – частота колебаний,  $\left(\frac{\omega}{c}(x - ct)\right)$  – фаза,  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

В полимерной среде необходимо учитывать затухание акустической волны, связанной с внутренним трением, неидеальным упругим свойствам и другими эффектами. Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения  $\alpha$  и коэффициента рассеяния  $\delta$ . При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остаётся звуковой, но уходит от направления волны в результате многократных отражений от неоднородностей структуры среды. Для упрощения решения задачи учитывается только поглощение звука введением мнимой части в волновое число  $k = 2\pi/\lambda + i\alpha$ . Таким образом, распространяющаяся в полимерной изоляции акустическая волна подчиняется соотношению:

$$\phi = A e^{i(kx - \omega t) - \alpha x},$$

где  $x$  – путь распространения волны

Учитывая (1), уравнение волны в полимерной изоляции:

$$A = A_0 e^{-\frac{x}{E \lambda^2} (2(-2 E \pi^2 \lambda^2 - \pi^2 \lambda \rho c^2 + \sqrt{(4 E \pi^4 \lambda^4 \rho c^2 + 4 E \pi^4 \lambda^6 \rho c^2 + \pi^4 \lambda^8 \rho c^4)}) )}, \quad (3)$$

где  $A_0$  – начальная амплитуда.

Взаимодействие двух параллельных проводников обмотки АД

$$F = \frac{\mu\mu_0 i_1 i_2}{a} l, \quad (4)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\mu_0$  – магнитная постоянная, сила тока в проводниках обмотки,  $a$  – расстояние между проводниками,  $l$  – длина проводников.

Для модели паза обмотки асинхронного двигателя (рис. 5), состоящей из двух проводников, формула (4) приобретает вид

$$F = \frac{\mu\mu_0 i^2}{2\pi a} l, \quad (5)$$

так как ток в проводниках имеет одинаковое значение. На площадку, ограниченную длиной  $l$  и высотой, равной диаметру проводника  $d$ , площадью  $S$  действует давление  $P$ , равное отношению силы  $F$  к площади  $S$ . Таким образом, если перейти от амплитуд звуковой волны к звуковым давлениям, то выражение (3) будет выглядеть так:

$$P = P_0 e^{-\frac{x}{E\lambda^2} (2(-2E\pi^2\lambda^2 - \pi^2\lambda\rho c^2 + \sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2 + 4E\pi^4\lambda^6\rho c^2 + \pi^4\lambda^8\rho c^4)}))} \quad (6)$$

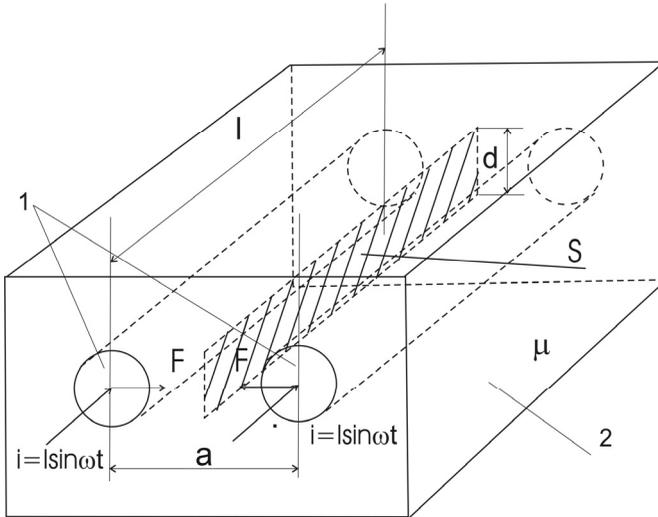


Рис 5. Модель паза обмотки асинхронного двигателя: 1 – проводники обмотки, 2 – изоляция

Уравнение (6) описывает распространение плоской волны, а с учётом формирования волны, обусловленной взаимодействием двух проводников в это уравнение необходимо внести поправку, связанную с фокальными расстояниями  $r_1$  и  $r_2$ .

Эквипотенциальные поверхности звуковой волны (рис. 6), порождаемой взаимодействием двух проводников описываются уравнением:

$$(x^2+y^2+(a/2)^2)^2-4(a/2)^2x^2=r^2, \quad (7)$$

где  $r_1 r_2 = r^2$

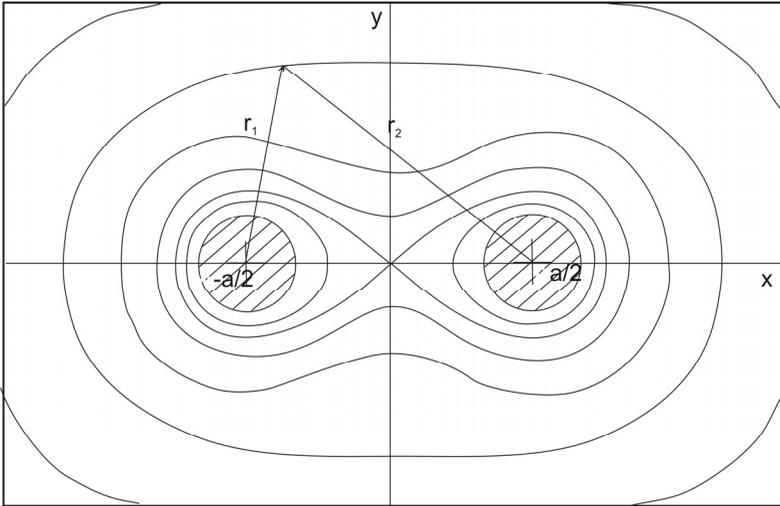


Рис. 6. Модель распространения волны при взаимодействии двух проводников обмотки в пазу:  $r_1$  и  $r_2$  – расстояния от центров проводников до эквипотенциальных поверхностей давления звуковой волны

Таким образом, акустическое давление:

$$P = P_0 e^{-\frac{r}{E\lambda^2}(2(-2E\pi^2\lambda^2-\pi^2\lambda\rho c^2+\sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2+4E\pi^4\lambda^6\rho c^2+\pi^4\lambda^8\rho c^4)}))} \quad (8)$$

Используя формулу (5), выражение (8) приобретёт следующий вид:

$$P = \frac{\mu\mu_0 i^2}{2\pi da} e^{-\frac{r(2(-2E\pi^2\lambda^2-\pi^2\lambda\rho c^2+\sqrt{(4E\pi^4\lambda^4\rho c^2+4E\pi^4\lambda^6\rho c^2+\pi^4\lambda^8\rho c^4)}))}{E\lambda^2}} \quad (9)$$

Считая, что на границе поверхность АД – пьезодатчик акустическое напряжение со стороны АД и акустическое напряжение со стороны пьезодатчика – поверхность АД равны исходя из граничных условий, то тогда величины  $P$  из

формулы (9) и  $T$  из (1) являются идентичными. Таким образом, электрическое напряжение, снимаемое с выхода приёмника, связано с показателем  $E$  изоляции следующим образом:

$$U = \frac{\mu\mu_0 i^2}{2\pi da} \frac{2eS}{h_1 z_1} z_a B F_1 G e^{\frac{r(2(-2E\pi^2 \lambda^2 - \pi^2 \lambda \rho c^2 + \sqrt{4E\pi^4 \lambda^2 \rho c^2 + 4E\pi^4 \lambda^2 \rho c^2 + \pi^4 \lambda^2 \rho c^4}))}{E \lambda^2}}}. \quad (10)$$

В соответствии с (7) эквипотенциальные поверхности акустической волны в различных фазах её движения, порождаемых притяжением двух объектов цилиндрической формы, показаны на рис. 7

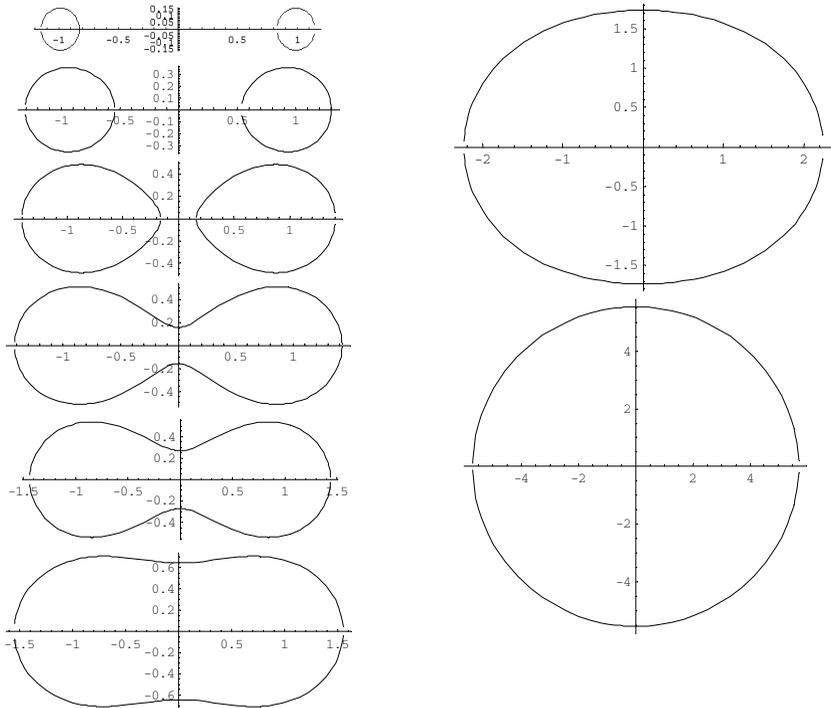


Рис. 7. Фазы формирования фронта волны в рассматриваемой модели

Уравнение (10) является математической моделью процесса распространения акустической волны в полимерной изоляции АД, порождаемым взаимодействием проводников с током.

В четвёртой главе рассматривается возможность контроля некоторых дефектов межвитковой изоляции акустическими волнами, показан расчёт механических напряжений и приведена практическая реализация технических средств диагностики на основе теории, изложенной в главе 3. В результате серии экспериментов были получены экспериментальные данные. Для быстродействующего и надёжного ввода-вывода данных и их обработки на базе высокопроизводительной шины PCI в данной диссертационной работе используется платы серии L7XX. Благодаря интерфейсу PCI обеспечивается высокая скорость обмена информацией (данными) с программой пользователя, исключаются конфликты с другим оборудованием, установленным в PC, и гарантируется полное отсутствие каких-либо конфигурационных перемычек и переключателей. Все режимы работы задаются программным способом. Учитывая то, что съём информации с АД может происходить в нескольких точках одновременно, то платы данной серии можно рассматривать как удобное средство многоканального сбора данных. С другой стороны, это устройство можно рассматривать и как законченную систему с собственным процессором, позволяющую пользователю реализовать свои собственные алгоритмы обработки сигналов на уровне программирования установленного на платах современного сигнального процессора.

На рис. 8 изображён вариант измерительного прибора. В этом случае всё управление прибором берёт на себя компьютерная программа лабораторных и научных исследований LabVIEW. Эксплуатационные воздействия на изоляцию электродвигателей определяются воздействием температуры, влаги, вибраций, агрессивных веществ, что соответствует тепловому, влажностному и механическому старению. Для имитации механических воздействий служит установка, включающая в себя вибростенд, пульт управления с контрольно-измерительной аппаратурой и устройства для автоматического поддержания режима работы. Для имитации климатических воздействий используется камера теплоты и влаги.

С помощью разработанных технических средств путём испытания образцов пропиточных лаков в камере теплоты и влаги, а также на вибростенде при воздействии на них влажности  $X_1$  (0–100%), температуры  $X_2$  (0–200°C) и виброскорости  $X_3$  (0–420 мм/с) получены данные по затуханию акустических, связанные с модулем упругости  $E$  и свидетельствующие о степени старения изоляции (рис. 9).

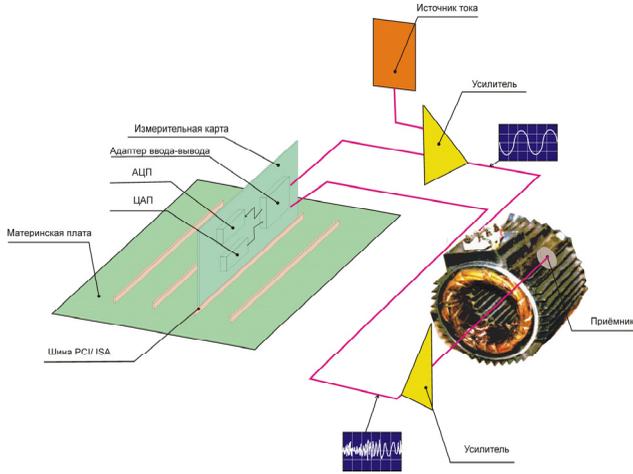


Рис. 8. Быстродействующая схема сопряжения измерительного комплекса

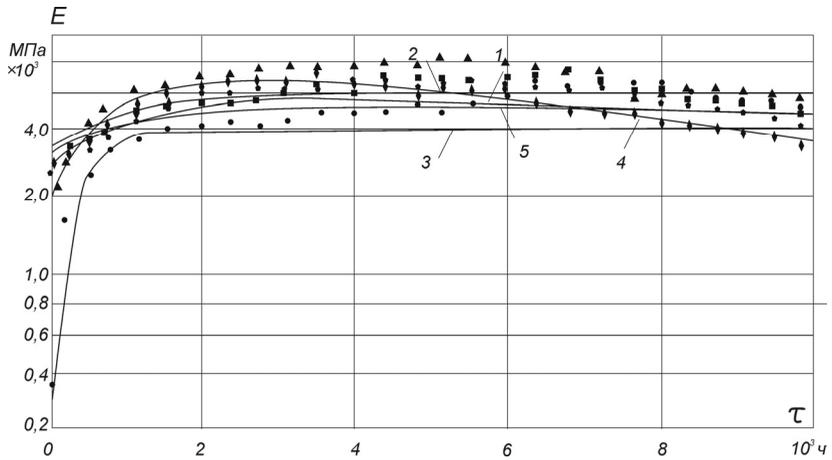


Рис. 9. Экспериментальные данные зависимости модуля упругости от времени теплового старения пропиточных материалов, измеренного при 20° С: 1–КП-103, 2–КП-101, 3–КП-18, 4–МЛ-92, 5–КП-34

Полином, являющийся моделью старения изоляции, выявлен с помощью регрессионного анализа результатов эксперимента и имеет следующий вид:

$$E \cdot 10^7 = 255,1 - 168,2X_1 - 154,2X_2 - 65,6X_3 + 128,5X_2X_1 + 44,6X_2X_3 + 120,1X_1X_3 - 32,1X_1X_2X_3 + 255,1,3X_1^2 + 255,1X_2^2 + 255,1X_3^2. \quad (11)$$

В пятой главе проведено технико-экономическое обоснование. Экономический эффект от внедрения установки акустического контроля составил 2,26 руб. на 1руб. затрат.

### **Основные выводы и результаты исследований**

1. Анализ влияния механических напряжений на надежность изоляции обмоток АД в условиях сельхозпроизводства показал, что контроль её физико-механических показателей является актуальным и его можно проводить с помощью акустических волн.

2. Выявлены связи показателя  $E$  с коэффициентом затухания волны  $\alpha$  и степенью старения изоляции, позволяющие разработать математическую модель процесса распространения акустической волны, порождённой магнитным взаимодействием проводников обмотки статора АД.

3. Полученные экспериментальные данные по затуханию акустических волн в изоляции, позволяют рассматривать показатель  $E$  как диагностический параметр, который характеризует степень её старения.

4. Результаты расчета воздействия электромагнитных полей, создаваемых током в проводниках обмотки показали, что помехи, обусловленные магнитострикционным и электродинамическим эффектами пренебрежительно малы и они практически не оказывают влияния на получение полезной диагностической информации.

5. Разработаны технические средства диагностики старения полимерной изоляции, позволяющие проводить её контроль в процессе эксплуатации АД.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Хомутов О.И., Суханкин Г.В., Сташко В.И., Герцен Н.Т. Математическая модель полимерной электрической изоляции. Ползуновский альманах №4, Барнаул 2001. С 71-77.

2. Герцен Н.Т. Виртуальный ультразвуковой генератор для исследования моделей изоляции электродвигателей. Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование физических процессов и систем». Н. Новгород, 2003.

3. Сташко В.И., Суханкин Г.В., Хомутов С.О., Герцен Н.Т. Методы диагностики изоляции электрических машин / Под редакцией Хомутова О.И. Уч. пособие. Барнаул, 2006. – 204 с.

4. Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. Акустическая диагностика изоляции электрических машин. Ползуновский вестник №4-2, Барнаул, 2006. С 424–429.

5. Герцен Н.Т. Контроль физико-механических характеристик полимерных материалов, предназначенных для изоляции обмоток электрических машин. Ползуновский вестник №4-2, Барнаул, 2006. С 399–401.

6. Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. Диагностика полимерной изоляции электрических машин с помощью акустических волн / Современные методы экспериментальных исследований. Вестник Томского государственного университета №64 март. Томск, 2006. С 44–51.

7. Хомутов О.И., Суханкин Г.В., Герцен Н.Т., Сташко В.И. Электрические и акустические методы диагностики изоляции электрических машин. Монография. Новосибирск: Наука, 2007. –210 с.

8. Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. Система акустической диагностики изоляции электрических машин. Надёжность №2. Москва, 2007.

Николай Теодорович Герцен

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ

Автореферат

Подписано в печать 1.09.2007. Формат 60×84 1/16

Печать – ризография. Усл. печ. л. 1,16

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ОАО «АДП», г. Барнаул, ул. Б.Олонская, 28