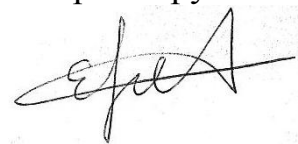


На правах рукописи



ЕРЕМОЧКИН СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОБИЛЬНЫХ МАШИН В АПК
НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ**

Специальность 05.20.02 -
Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2014

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и автоматизированный электропривод» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: **Халина Татьяна Михайловна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Наумов Игорь Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Иркутская государственная сельскохозяйственная академия», кафедра
«Электроснабжения и электротехники»

Меновщиков Юрий Александрович
кандидат технических наук, доцент,
ГНУ СибИМЭ СО Россельхозакадемии.

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет».

Защита состоится «**11**» **июня 2014 г.**, в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.
<http://www.altstu.ru>; ntsc@desert.secna.ru; elnis@inbox.ru.
Тел./факс 8(3852) 36-71-29

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Автореферат разослан «10» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Куликова Лидия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время ситуация в сельском хозяйстве России складывается таким образом, что при наличии достаточных запасов природных и техногенных ресурсов для производства продовольствия внутри страны в полном объеме – фактическое его производство составляет только половину необходимого. Остальная часть продуктов питания завозится по импорту из-за рубежа. Огромная роль в покрытии дефицита продуктов питания при этом отводится фермерским и личным подсобным хозяйствам населения.

Развитие сельскохозяйственного производства стало толчком к разработке ряда новых мобильных электрифицированных машин: передвижных механических транспортеров и кормораздатчиков, измельчителей грубых кормов, коммодрилок, электронасосов, индивидуальных доильных аппаратов и др. Одним из основных средств для приведения в движение почти всех указанных машин является электродвигатель. Реализация основных потребительских свойств мобильных сельскохозяйственных машин, механизмов и агрегатов происходит в процессе их движения. В электроприводе мобильных машин в большинстве случаев используются трехфазные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели. Электрические двигатели мобильных машин получают питание через гибкий кабель, который последовательно разматывается с барабана и наматывается на барабан, расположенный на агрегате. Зачастую, площадь обслуживаемых и обрабатываемых участков может достигать значительных размеров и при использовании трехфазной системы электроснабжения происходит значительное увеличение стоимости всей мобильной техники. Если для питания использовать однофазную систему электроснабжения, то это позволит снизить стоимость, а также габариты мобильной сельскохозяйственной машины за счет применения более дешевого и менее габаритного кабеля с меньшим количеством жил.

Кроме того, у крупных фермерских хозяйствах обычно существует несколько структурных подразделений, занятых обработкой и хранением различных сельскохозяйственных культур и рассредоточенных по большой территории. И если в главных подразделениях для питания мобильных сельскохозяйственных машин имеется трехфазная сеть, то в отдаленных филиалах обычно проведена только однофазная сеть, что осложняет запуск трехфазных электродвигателей мобильных машин. В связи с этим, актуальным становится вопрос обеспечения надежной работы трехфазных асинхронных двигателей мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин от однофазной сети переменного тока.

По данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Алтайскому краю на 01.01.2013 года в Алтайском крае зарегистрировано 2877 сельскохозяйственных производителей, большая часть которых расположена в сельской местности. Согласно статистическим данным ОАО «Алтайкрайэнерго» (приложение А) более 90% абонентов частного сектора и более 40% абонентов коммерческого сектора в сельской местности Алтай-

ского края не имеют трехфазного источника электрической энергии. В то же время возможно использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии – солнца, ветра, теплоты земных недр, приливов и др. В ряде случаев при использовании этой энергии получение трехфазного источника питания для сельскохозяйственного электрооборудования затруднительно. Поэтому и в этом случае предпочтение отдается использованию однофазной системы электроснабжения.

Как известно, в сельскохозяйственном производстве широкое распространение получили трехфазные и однофазные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели, что предопределяется рядом их преимуществ над двигателями постоянного тока: более высокой надежностью и производительностью, простотой в эксплуатации, низкой стоимостью и габаритами. В результате проведенных исследований установлено, что по таким показателям, как стоимость, коэффициент полезного действия и габариты, трехфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели имеют преимущества перед однофазными.

Актуальным, в связи с вышесказанным, становится вопрос выбора способа запуска и работы трехфазных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин от однофазной сети.

Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в однофазную сеть выдвигает ряд особенных требований. На сегодняшний день наибольшее распространение получили три способа питания трехфазного двигателя от однофазной сети:

- метод прямого включения;
- использование емкостных или индуктивно-емкостных фазосдвигающих цепей;
- запуск и работа с помощью частотного преобразователя.

Недостатками первых двух способов запуска и работы трехфазного двигателя от однофазной сети являются значительное понижение момента и развиваемой электродвигателем мощности, а также необходимость использования, во втором случае, набора конденсаторов различной емкости при различной величине нагрузки и заметные трудности в организации регулирования скорости двигателя. Применение частотных преобразователей в однофазной сети для питания трехфазных асинхронных электродвигателей небольшой мощности, в ряде случаев не рационально из-за их высокой стоимости.

В связи с наличием у рассмотренных способов запуска и работы трехфазных двигателей от однофазной сети ряда существенных недостатков, необходимо разработать новый способ запуска, обеспечивающий повышение энергетических характеристик, а также возможность регулирования угловой скорости электродвигателя.

Таким образом, **целью исследований** является нахождение новых способов питания трехфазных асинхронных двигателей мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин от однофазной сети.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать метод управления вращающимся магнитным полем трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя мобильной сельскохозяйственной электрифицированной машины при питании от однофазной сети переменного тока;

- сформулировать методику расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток трехфазного асинхронного электродвигателя, питание которого осуществляется от однофазной сети переменного тока, путем векторно-алгоритмической коммутации статорных обмоток, а также разработать программное обеспечение;

- обосновать теоретически и подтвердить экспериментально возможность векторно-алгоритмического управления электродвигателем и обеспечить необходимые механические и энергетические характеристики электропривода;

- разработать силовые электрические схемы частотных преобразователей для трехфазного асинхронного электродвигателя при питании от однофазной сети, а также системы автоматического управления с заданными эксплуатационными показателями;

- определить эффективность предлагаемого метода управления трехфазными асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями мобильных сельскохозяйственных машин, механизмов и агрегатов.

Объект исследований. Процессы функционирования полупроводниковых преобразователей векторно-алгоритмического типа в электроприводе мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин.

Предмет исследований. Трехфазный электропривод мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин с полупроводниковыми преобразователями векторно-алгоритмического типа при питании от однофазной сети переменного тока.

Методология и методы исследований. При выполнении работы применялись основные положения теоретических основ электротехники, электроники, разделы математического анализа, аналитической геометрии и высшей математики.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

- предложен новый векторно-алгоритмический метод управления вращающимся магнитным полем, позволяющий осуществить запуск и работу трехфазного асинхронного электродвигателя от однофазной сети переменного тока;

- разработана и сформулирована новая методика расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток, обеспечивающая построение механических характеристик электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа;

- разработаны теоретические основы специальных полупроводниковых систем автоматического управления, реализующих разработанный метод векторно-алгоритмической коммутации статорных обмоток трехфазного асинхронного электродвигателя, представляющие возможность повысить быстродействие, а также снизить габариты и стоимость электропривода;

- разработаны на уровне изобретений новые технические решения, относящиеся к автоматизированному электроприводу, включающие разработку мето-

да управления преобразователями векторно-алгоритмического типа, позволяющего обеспечить регулирование угловой скорости и повышение энергетических показателей трехфазного асинхронного электродвигателя.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны преобразователи векторно-алгоритмического типа с использованием трехфазного электродвигателя, питание которого осуществляется от однофазной сети, при соединении обмоток статора по схемам «треугольник», «звезда с выводом нулевой точки» и «разъединенная звезда» для электропривода мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин фермерских хозяйств.

2. Получены опытно-экспериментальные характеристики трехфазного электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа, которые свидетельствуют о целесообразности его использования в электроприводе мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин фермерских хозяйств.

3. Разработано соответствующее программное обеспечение для управления пуском, работой, регулировкой скорости и для расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении.

4. Даны практические рекомендации по применению разработанных преобразователей векторно-алгоритмического типа в условиях сельскохозяйственного производства для крестьянско-фермерских хозяйств.

Работа выполнена в соответствии с Концепцией развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года (МСХ РФ, приказ от 25 июня 2007 года №342), общероссийской федеральной программой «Энергоэффективная экономика»: раздел «Энергоэффективность в сельском хозяйстве» (постановление Правительства РФ от 17 ноября 2001 г. № 796).

Результаты диссертационной работы включены в Образовательный стандарт учебной дисциплины «Электропривод в современных технологиях» по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» в АлтГТУ.

Реализация результатов исследований. Разработанные полупроводниковый коммутатор и преобразователи частоты векторно-алгоритмического типа внедрены в:

- крестьянско-фермерском хозяйстве Кремер Е. В. (с. Зудилово, Первомайский район, Алтайский край), в котором была произведена модернизация электропривода машины очистки корнеплодов МОК-150М ($P_n = 0,75$ кВт, $U_n = 220/380$ В, $I_n = 3,3/1,9$ А, $n_n = 1350$ об/мин, $\cos\phi = 0,75$);

- крестьянско-фермерском хозяйстве Федосова Е. В. (с. Сорочий Лог, Первомайский район, Алтайский край), в котором была произведена модернизация шестеренного насоса перекачки молока модели ВЗ-0Р2-А ($P_n = 0,75$ кВт, $U_n = 220/380$ В, $I_n = 4/2,3$ А, $n_n = 920$ об/мин, $\cos\phi = 0,71$).

Апробация. Основные материалы и результаты работы были представлены и обсуждались на XVII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2011); VIII

Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (Москва, 2012); XIV Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» (Екатеринбург, 2012); VII Международной конференции технических и физических проблем электроэнергетики (Лefкоза, Республика Кипр, 2011); VIII Международной конференции технических и физических проблем электроэнергетики (Фредрикстад, Норвегия, 2012); VII Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (Барнаул, 2012); работа удостоена I места в 10-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь-2013».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Концепция применения трехфазных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей в электроприводе мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин, механизмов и агрегатов при питании от однофазной сети, учитывающая особенности их работы и условия окружающей среды.

2. Векторно-алгоритмический метод управления, позволяющий осуществлять запуск, реверс и работу трехфазного электродвигателя от однофазной сети в энергоэффективных режимах.

3. Методика расчета среднего значения векторов напряжения, позволяющая производить построение механических характеристик электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети посредством векторно-алгоритмического управления.

4. Эффективные режимы работы, новые схемы и экспериментальные образцы преобразователей векторно-алгоритмического типа для трехфазных электродвигателей мобильных сельскохозяйственных машин, обладающие высоким быстродействием, низкой ценой, уменьшенными габаритами, а также улучшенными энергетическими показателями.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 15 научных работах, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 зарубежные публикации, получены 2 патента на изобретения и 2 патента на полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 155 страницах, содержит 73 рисунка, 14 таблиц, 4 приложения; список литературы включает в себя 152 наименования.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод», к.т.н. Стальной М. И., принимавшей непосредственное участие в обсуждении результатов и проведении экспериментальных исследований на различных этапах выполнения работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен сопоставительный технико-экономический анализ трехфазных и однофазных асинхронных электродвигателей для электропривода мобильных сельскохозяйственных машин, представлен обзор мобильных сельскохозяйственных электрифицированных машин с регулируемым и нерегулируемым трехфазным асинхронным электроприводом; рассмотрены существующие методы запуска и работы, а также регулирования угловой скорости трехфазного электродвигателя при питании от однофазной сети и проведен анализ их достоинств и недостатков.

Как известно, для получения кругового или близкого к круговому эллиптического поля двигателя применяют фазосдвигающие устройства: резисторы, катушки индуктивности или конденсаторы. Наибольшее применение в силу ряда достоинств находят схемы включения асинхронного электродвигателя с конденсатором в качестве пусковой и рабочей емкостей. Простой является схема включения в однофазную сеть, в которой в качестве пускового и рабочего элемента используется пусковой конденсатор, угловая скорость двигателя при этом не регулируется.

Известные способы запуска и работы трехфазного двигателя от однофазной сети с использованием емкостных и индуктивно-емкостных фазосдвигающих цепей имеют ряд известных существенных недостатков. Вследствие этого возникает задача нахождения более простого, стабильного и малогабаритного способа включения трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя в однофазную сеть.

В настоящее время одним из направлений регулирования скорости электродвигателей в сельском хозяйстве является внедрение частотно-регулируемого электропривода. Огромный вклад в развитие исследований, связанных с применением электротехнологий в сельском хозяйстве и построении систем управления электроприводом переменного тока внесли российские ученые А. Я. Бернштейн, И. Я. Браславский, А. Б. Виноградов, Н. Ф. Ильинский, В. И. Ключев, С. А. Ковчин, Г. Б. Онищенко, Ю. А. Сабинин, Н. В. Терехов, В. М. Цугленок, В. А. Шубенко, Р. Т. Шрейнер и др.

Несмотря на хорошие регулировочные свойства электроприводов с частотными преобразователями, питающимися от однофазной сети, у них имеются весьма существенные недостатки, которые в большей степени проявляются в электроприводах небольшой мощности, в том числе двойное преобразование энергии в выпрямителе и инверторе, необходимость регулирования величины напряжения, повышенные габариты и стоимость всей установки как за счет двойного преобразования энергии в выпрямителе и в преобразователе частоты, так и за счет дополнительного фильтра и повышающего трансформатора,

сложность системы управления преобразователя частоты, большие эксплуатационные расходы.

Для электроприводов небольшой мощности, используемых в фермерских хозяйствах и сельскохозяйственных комплексах (центробежные механизмы, установки с кривошипно-шатунным механизмом, механические транспортеры, машины первичной переработки продуктов и приготовления кормов), использование известных способов запуска, работы и регулирования угловой скорости электродвигателя неприемлемо ввиду целого ряда их недостатков. В связи с этим, необходимо разработать новые схемы запуска, работы и реверса трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, питающегося от однофазной сети, а также схемы с возможностью осуществления дискретного регулирования угловой скорости как выше, так и ниже номинальной в небольшом диапазоне, обладающие повышенными энергетическими характеристиками, низкой стоимостью и небольшими габаритами.

При этом разрабатываемый специальный частотный преобразователь должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- обеспечивать получение повышенного коэффициента полезного действия;
- отсутствие звена постоянного тока;
- отсутствие сглаживающего фильтра и повышающего трансформатора;
- возможность осуществления регулирования угловой скорости трехфазного асинхронного электродвигателя в рабочих и пусковых режимах;
- обеспечение значения развиваемого момента и мощности на валу электродвигателя не менее 50% от номинальных значений;
- уменьшенные габариты, вес, стоимость и эксплуатационные расходы.

Во второй главе приводится обоснование векторно-алгоритмического метода управления трехфазными электродвигателями, а также доказана необходимость разработки новых силовых схем коммутации и управления обмотками трехфазных электродвигателей при питании от однофазной сети и систем автоматического управления.

В соответствии с разработанными требованиями, предъявляемыми к электроприводу в условиях сельскохозяйственного производства, предлагаются новый векторно-алгоритмический метод управления магнитным полем и соответствующие этому методу схемы бесконденсаторного запуска и работы трехфазных двигателей от однофазной сети, частотные преобразователи, использующие принципиально новый метод питания от однофазной сети с возможностью осуществления реверса и регулировки частоты вращения выше и ниже номинальной.

Существующие схемы создания магнитного поля при включении трехфазного двигателя в однофазную сеть не дают кругового или близкого к нему вращающегося магнитного поля и не позволяют осуществлять регулирование угловой скорости электродвигателя, а также обладают низкими энергетическими показателями.

Разработан новый метод векторно-алгоритмического управления, который позволит осуществлять запуск, работу и регулирование скорости трехфазных асинхронных электродвигателей при питании от однофазной сети. При этом

векторно-алгоритмическое управление осуществляется путем алгоритмической коммутации статорных обмоток электродвигателя в определенной последовательности и полярности. Векторно-алгоритмическим управлением возможно создавать несколько типов вращающихся магнитных полей путем прохождения четырех, шести, восьми и т.д. фиксированных положений вектора магнитного потока Φ вращающегося поля электродвигателя с разной частотой.

Для обеспечения работы трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя от однофазной сети переменного тока без осуществления регулирования угловой скорости, но с возможностью осуществления реверса, разработана схема однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью (рисунок 1).

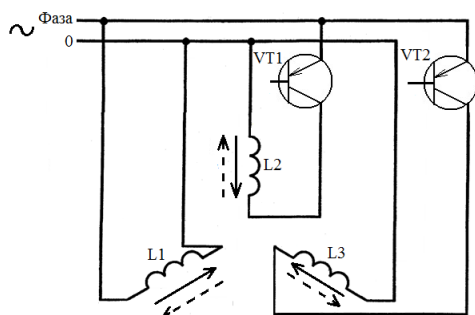


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью

В работе однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью, используется свойство биполярных транзисторов пропускать ток в ключевом режиме в прямом и обратном направлениях вследствие симметричной структуры. В качестве полупроводниковых ключей в такой схеме возможно использовать полевые транзисторы, которые также пропускают ток в обоих направлениях, без необходимости учета полярности напряжения, проходящего через транзисторы.

В случае если необходимо осуществление регулирования угловой скорости электродвигателя, питание которого осуществляется от однофазной сети переменного тока как выше, так и ниже номинальной, при соединении статорных обмоток в треугольник и звезду с выводом нулевой точки были разработаны однофазный частотный регулятор скорости, ведомый сетью (патент RU №2461118) и однофазно-трехфазный транзисторный преобразователь частоты, ведомый сетью (патент RU №121406).

Для системы управления силовыми транзисторами выбрана современная элементная база на цифровых и логических элементах ввиду ряда их достоинств. Обобщенная структурная схема алгоритмической системы управления (АлСУ) показана на рисунке 2.

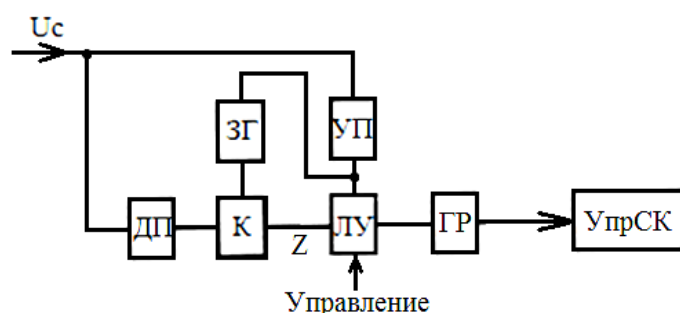


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема АлСУ электродвигателем

На рисунке 2 используются следующие обозначения: УП – устройство питания системы управления, ДП – датчик полярности напряжения, ЗГ – задающий генератор, К – коммутатор, Z – импульсные сигналы, ЛУ – логическое устройство, ГР – гальваническая развязка, УпрСК – управляемые силовые ключи.

В третьей главе приводится теоретический расчет и исследование характеристик трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети посредством векторно-алгоритмического управления, обоснование разработки векторно-алгоритмического метода расчета, исследование и расчет механических характеристик трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, а также разработанное программное обеспечение для расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении.

Зачастую, для получения математического описания характеристик любой электрической машины с круговым полем в воздушном зазоре ее сводят к обобщенной электрической машине, то есть идеализированной двухполюсной машине с двумя парами обмоток на статоре и роторе.

Уравнения для нахождения потокосцепления в обобщенной машине в фазовых непреобразованных координатах имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \psi_a^s &= L_a^s i_a^s + \mu(\cos \theta) i_a^r + \mu(\sin \theta) i_b^r; \\ \psi_b^s &= L_b^s i_b^s + \mu(\cos \theta) i_b^r - \mu(\sin \theta) i_a^r; \\ \psi_a^r &= L_a^r i_a^r + \mu(\cos \theta) i_a^s - \mu(\sin \theta) i_b^s; \\ \psi_b^r &= L_b^r i_b^r + \mu(\cos \theta) i_b^s + \mu(\sin \theta) i_a^s. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Тогда вращающий момент электродвигателя, выраженный через потокосцепление, может быть найден по формуле

$$M = \frac{m}{2} \frac{\mu}{L^s L^r - \mu^2} (\psi_\beta^s \psi_\alpha^r - \psi_\alpha^s \psi_\beta^r). \quad (2)$$

Однако при векторно-алгоритмическом управлении асинхронным электродвигателем известная модель идеализированной двухполюсной машины и схемы замещения, а также круговая диаграмма не могут быть использованы в абсолютном выражении без корректирования для расчета мощности и электромагнитного момента.

В связи с этим разработан новый векторно-алгоритмический метод расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток трехфазного электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети посредством векторно-алгоритмического управления. В результате проведенных многочисленных исследований порядок расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток сформулирован следующим образом. Прежде всего, задаются параметры электродвигателя: номинальное напряжение (U_n), число полувольт напряжения в периоде регулирования (N), частота питающей сети ($f_{\text{сети}}$), количество промежутков γ коммутации (переключений) Z_L (рисунок 3) в одном периоде регулируемой частоты, количество участков p тактирования K_j в каждом из промежутков коммутации Z_L . Затем рассчитываются величина каждого промежутка коммутации Z_L в градусах (секундах) и величина каждого участка тактирования K_j внутри участка коммутации Z_L в градусах (секундах), причем число участков тактирования K_j в каждом из промежутков коммутации Z_L периода регулируемой частоты является постоянной величиной, равной p . Определяется способ соединения статорных обмоток электродвигателя – «треугольник», «звезда», «звезда с выводом нулевой точки» и «разъединенная звезда» – на начальном этапе порядок расчета для каждого способа соединения статорных обмоток различный.

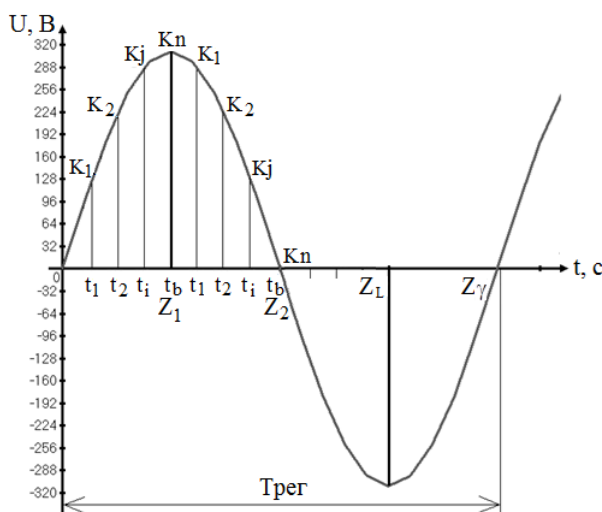


Рисунок 3 – Осциллограмма напряжения, поступающего на статорные обмотки электродвигателя

На рисунке 3 используются следующие обозначения:

L изменяется от I до γ , где γ – количество промежутков коммутации в периоде регулирования;

t_i – моменты времени;

j изменяется от 1 до p , где p – количество участков тактирования в промежутке коммутации Z_L .

Порядок расчета суммарного значения векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя в периоде регулирования для соединения обмоток статора, например в «треугольник», следующий.

В каждом из K_j участков тактирования для каждой из обмоток определяется приложенное к ней напряжение $U_{обм,j}$, и при этом учитывается направление протекающего по ней тока, а следовательно, и потока. Мгновенное значение напряжения вычисляется по формуле

$$U = U_m \cdot \sin \cdot \omega t_i, \quad (3)$$

где U_m – максимальное значение питающего синусоидального напряжения, поступающего на статорные обмотки электродвигателя.

При этом на каждом из K_j участков тактирования значение напряжения находится по формуле

$$U_{KjZ_L} = U_m \cdot \sin \cdot \omega t_i, \quad (4)$$

где U_{KjZ_L} – значение напряжения на участке тактирования K_j в промежутке коммутации Z_L .

В каждом из K_j участков тактирования производится векторное сложение по теореме косинусов двух векторов, величина каждого из которых равна «+» $\frac{U_m}{2} \cdot \sin \cdot \omega t_i$ или «-» $\frac{U_m}{2} \cdot \sin \cdot \omega t_i$. Например, для векторов А и В формула будет иметь вид:

$$\dot{U}_{KjZ_LA} + \dot{U}_{KjZ_LB} = \sqrt{U_{KjZ_LA}^2 + U_{KjZ_LB}^2 + 2 \cdot U_{KjZ_LA} \cdot U_{KjZ_LB} \cdot \cos \alpha}. \quad (5)$$

Причем сначала производится векторное сложение по теореме косинусов, например, двух значений с напряжением либо «+» $\frac{U_m}{2} \cdot \sin \cdot \omega t_i$, либо «-» $\frac{U_m}{2} \cdot \sin \cdot \omega t_i$, причем значения векторов напряжения на обмотках берутся без учета знака и угол между ними всегда 120 эл. градусов. Затем к рассчитанному значению прибавляется третье значение напряжения на обмотке С, которое будет либо «+» $U_m \cdot \sin \cdot \omega t_i$, либо «-» $U_m \cdot \sin \cdot \omega t_i$. Тогда, например, для участка К1 промежутка Z_L напряжение по величине (модулю) может быть вычислено по формуле

$$\dot{U}_{K1Z_LABC} = \dot{U}_{K1Z_LAB} + \dot{U}_{K1Z_LC}; \quad (6)$$

где $\dot{U}_{K1Z_LABC}$ – суммарное значение векторов напряжений статорных обмоток А, В и С на участке тактирования К1 в периоде коммутации Z_L ;

$\dot{U}_{K1Z_LAB}$ – суммарное значение векторов напряжения статорной обмотки А и В на участке тактирования К1 в периоде коммутации Z_L ;

$\dot{U}_{K1Z_LC}$ – значение вектора напряжения статорной обмотки С на участке тактирования К1 в периоде коммутации Z_L .

Таким образом, с учетом вышеизложенного значения вектора напряжения находятся для каждого участка тактирования Кj в каждом из промежутков коммутации Z_L по формуле

$$\dot{U}_{KjZ_LABC} = \dot{U}_{KjZ_LA} + \dot{U}_{KjZ_LB} + \dot{U}_{KjZ_LC}; \quad (7)$$

где $\dot{U}_{KjZ_LABC}$ – вектор суммарного значения векторов напряжения статорных обмоток А, В и С электродвигателя на участке тактирования Кj в периоде коммутации Z_L ;

$\dot{U}_{KjZ_LA}, \dot{U}_{KjZ_LB}, \dot{U}_{KjZ_LC}$ – вектора напряжения обмотки А, В и С соответственно на участке тактирования Кj в периоде коммутации Z_L .

Тогда вектор суммарного значения векторов напряжения статорных обмоток А, В и С электродвигателя на участке тактирования Кj в периоде коммутации Z_L может быть найден по формуле

$$\dot{U}_{KjZ_LABC} = 1,5 \dot{U}_{KjZ_LA} = 1,5 \dot{U}_{KjZ_LB} = 1,5 \dot{U}_{KjZ_LC}. \quad (8)$$

Затем находится суммарное значение векторов напряжения статорных обмоток А, В и С электродвигателя в промежутке коммутации Z_L

$$\dot{U}_{Z_LABC} = \sum_{j=1}^n \dot{U}_{KjZ_LABC} = \dot{U}_{K1Z_LABC} + \dot{U}_{K2Z_LABC} + \dots + \dot{U}_{KnZ_LABC}); \quad (9)$$

где $\dot{U}_{Z_LABC}$ – суммарное значение векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя А, В и С в промежутке коммутации Z_L .

После этого находится среднее значение вектора напряжения $\dot{U}_{Z_L.c.p.1\phi}$ от всех работающих статорных обмоток в каждом из промежутков коммутации электродвигателя, питающегося от однофазного источника электроэнергии, по формуле

$$\dot{U}_{Z_L.c.p.1\phi} = \frac{\dot{U}_{Z_LABC}}{n}. \quad (10)$$

На основании вышеприведенной методики по формуле Клосса строятся механические характеристики трехфазного электродвигателя ($P_H=16$ Вт,

$U_n=220/380\text{ В}$, $I_n=0,17/0,1\text{ А}$, $n_n=1300\text{ об/мин}$) лабораторной установки при питании от однофазной сети с помощью однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью (рисунок 4).

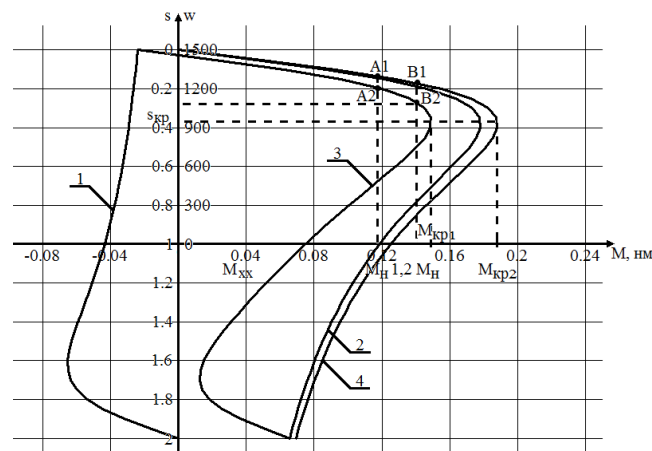


Рисунок 4 – Механические характеристики асинхронного электродвигателя лабораторной установки

На рисунке 4 используются следующие обозначения: 1 – механическая характеристика обратной составляющей момента при работе электродвигателя на искусственной характеристике; 2 – механическая характеристика прямой составляющей момента при работе электродвигателя на искусственной характеристике; 3 – искусственная механическая характеристика электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети с помощью разработанного однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора; 4 – естественная механическая характеристика электродвигателя.

Из рисунка 4 видно, что пусковой момент $M_{п.иск}$ суммарной характеристики равен 0,075 Нм, что составляет примерно 60% от пускового момента (0,125 Нм) $M_{п.ест}$ на естественной механической характеристике. Критический момент $M_{кр1}$ суммарной характеристики равен 0,1488 Нм, что составляет 79% от критического момента $M_{кр2}=0,188\text{ Нм}$ естественной механической характеристики, кратность пускового момента к номинальному уменьшается с 1,06 до 0,64, а кратность критического момента по отношению к номинальному уменьшается с 1,6 до 1,27.

Трехфазный асинхронный электродвигатель при питании от однофазной сети посредством однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью имеет:

- пусковой момент $M_{п.иск} \approx 0,6M_{п.ест}$ и рекомендуется пускать на холостом ходу или с моментом сопротивления $\leq 0,6M_n$, а затем подключать нагрузку; причем при использовании предлагаемой схемы коммутатора, например, в электроприводе вентилятора, включать электродвигатель можно сразу на

нагрузку, так как у вентилятора начальный момент нагрузки примерно равен моменту холостого хода M_{xx} и составляет менее 30% от номинального;

- электродвигатель может длительно работать с моментом сопротивления, равным номинальному моменту (точка A2). При этом будет несколько снижена номинальная скорость (с 1300 до 1200 об/мин) примерно на 7,7%;

- электродвигатель даже может работать с моментом, равным $1,2 M_n$ (точка B2), и так как критический момент при работе на искусственной характеристике равен $1,27 M_n$, электродвигатель не выпадает из асинхронного режима;

- так как скорость вращения при номинальном моменте незначительно отличается (меньше на 7,7%) от номинальной, то производительность электропривода с таким включением асинхронного электродвигателя падает незначительно.

В соответствии с методикой расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении разработано специализированное программное обеспечение.

В четвертой главе представлены результаты опытно-экспериментальных исследований механических и энергетических характеристик предложенных запатентованных систем управления электродвигателем, исследованы и рассчитаны технико-экономические показатели.

Тахограмма разгона двигателя в режиме холостого хода представлена на рисунке 5.

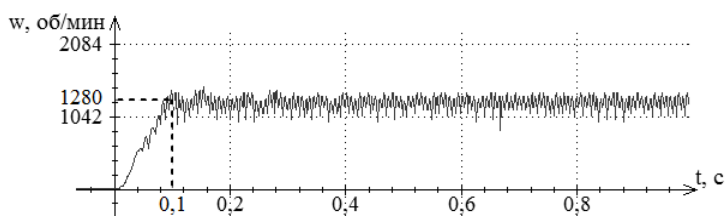


Рисунок 5 – Тахограмма разгона электродвигателя в режиме холостого хода

Из тахограммы разгоны электродвигателя видно, что электродвигатель разгоняется до скорости 1280 об/мин за 0,1 секунды.

Осциллограммы токов статорных обмоток трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя ($P_n=0,25$ кВт, $U_n=380/220$ В, $I_n=1,49/0,86$ А, $n_n=1380$ об/мин), запуск и работа которого осуществлялась от однофазной сети посредством однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора (рисунок 1), представлены на рисунке 6.

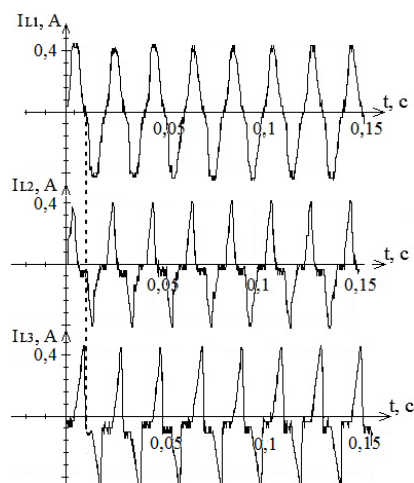


Рисунок 6 – Осциллограммы токов статорных обмоток электродвигателя

Опытно-экспериментальная механическая характеристика трехфазного электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети с помощью однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, показана на рисунке 7.

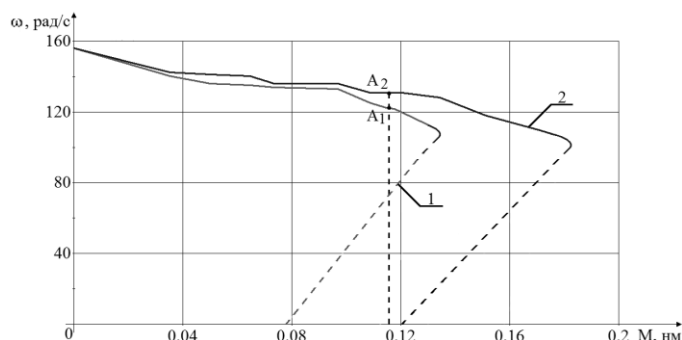


Рисунок 7 – Зависимость скорости от момента на валу:

1 – двигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети с помощью разработанного коммутатора; 2 – двигателя, запуск и работа которого осуществляется от трехфазной сети

Из графика, представленного на рисунке 7, видно, что пусковой момент электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети с помощью однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора (искусственная характеристика 1), равен 0,079 Нм, что составляет 66% от пускового момента (0,12 Нм) двигателя, запуск и работа которого осуществляется от трехфазной сети переменного тока (естественная характеристика 2). Критический момент равен 0,134 Нм, что составляет 74% от критического момента (0,182 Нм), развиваемого двигателем при трехфазном включении. При номинальном моменте скорость электродвигателя при работе на искусственной характеристике (точка A1) меньше скорости электродвигателя при работе на естественной характеристике (точка A2) на 7%, что незначительно уменьшает производительность электропривода с разработанным преобразователем.

Кроме того, из графика, представленного на рисунке 7, видно, что опытно-экспериментальная механическая характеристика электродвигателя, запуск и работ которого осуществляется от однофазной сети с помощью разработанного однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, совпадает с теоретической механической характеристикой, представленной на рисунке 4, что свидетельствует о правильности теоретических расчетов.

На основании проведенного сопоставительного анализа установлено, что разработанные электроприводы с использованием однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора и однофазного частотного регулятора скорости, по всем энергетическим показателям значительно эффективнее известных простых методов запуска и работы трехфазного электродвигателя от однофазной сети. Электропривод с использованием однофазно-трехфазного транзисторного преобразователя частоты, ведомого сетью, эффективнее метода прямого включения и сопоставим по энергетическим показателям с конденсаторным методом. Однако при использовании однофазно-трехфазного транзисторного преобразователя частоты, ведомого сетью, возможно осуществлять дискретное регулирование угловой скорости электродвигателя как выше, так и ниже номинальной.

В пятой главе приведены результаты испытаний разработанного преобразователя векторно-алгоритмического типа в условиях крестьянско-фермерского хозяйства, а также расчет экономической эффективности, даны общие выводы и рекомендации.

В рамках проведения экспериментальных исследований была проведена модернизация электропривода машины очистки корнеплодов МОК-150М в крестьянско-фермерском хозяйстве Кремер Е. В. Для очистки картофеля и корнеплодов (свекла, морковь) в КФХ Кремер Е. В. используется машина очистки корнеплодов МОК-150М. Процесс очистки состоит в механическом воздействии на продукт рабочих органов (чаши абразивной и внутренней камеры с отверстиями) и воды. Мезга удаляется через отверстия на дне машины по сливному шлангу в канализацию напрямую или через фильтр-отстойник. С целью обеспечения функционирования машины очистки корнеплодов в отсутствии трехфазного источника электроэнергии была проведена модернизация электропривода путем установки однофазно-трехфазного полупроводникового реверсивного коммутатора, ведомого однофазной сетью.

Запуск электродвигателя производился на холостом ходу без изменения частоты тактирования транзисторов, но с использованием ШИМ для уменьшения напряжения и тока во время пуска. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что электропривод машины МОК-150М с использованием однофазно-трехфазного транзисторного реверсивного коммутатора, работает четко и без сбоев. Запуск и работа трехфазного асинхронного электродвигателя (тип АИР71В4, $P_n = 0,75$ кВт, $n_n = 1350$ об/мин, $\cos\phi = 0,75$) установки осуществлялись от однофазной сети посредством векторно-алгоритмической коммутации статорных обмоток. Работа электропривода осуществлялась с 50, 60 и 70% загрузкой. Нагрева двигателя до недопустимой температуры не наблюдалось. Режим работы механизма длительный. При

нагрузке, равной номинальной, обмотки двигателя нагревались до температуры 50 градусов за 45 минут.

Таким образом, используя предлагаемый однофазно-трехфазный транзисторный реверсивный коммутатор, можно осуществлять запуск и работу трехфазных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей от однофазной сети переменного тока на нагрузке не более 70% от номинальной, что во многих случаях удовлетворяет условиям эксплуатации.

Чистый дисконтированный доход при использовании электропривода с трехфазным двигателем и разработанным преобразователем, при сопоставлении с электроприводом с однофазным электродвигателем, составляет 2300 (руб.), срок окупаемости – 1 год, что укладывается в нормативные сроки.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработан новый векторно-алгоритмический метод управления, позволяющий обеспечить функционирование в наиболее энергоэффективных режимах трехфазных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей мобильных сельскохозяйственных машин при питании от однофазной сети переменного тока.

2. В результате теоретических исследований установлено, что разработанный метод векторно-алгоритмического управления обеспечивает повышение мощности на валу электродвигателя до 85%, коэффициента полезного действия до 91%, перегрузочной способности до 1,14, пускового и критического моментов до 66% и 74% соответственно, коэффициента мощности до 72,3 % от номинальных значений.

3. Разработана методика расчета среднего значения векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении, позволяющая осуществить построение теоретических механических характеристик электродвигателя, а также уменьшить время расчетов. С помощью методики установлены аналитические зависимости параметров асинхронного электродвигателя и систем автоматического управления для обеспечения наиболее энергоэффективного режима работы электродвигателя.

4. Разработаны системы автоматического управления на логической и цифровой элементной базе, обладающие высокой эффективностью, низкой стоимостью и габаритами. Системы автоматического управления преобразователями векторно-алгоритмического типа обеспечивают регулирование угловой скорости двигателя в диапазоне от 16,6 до 100 Гц (диапазон регулирования 1:6), работу при пониженном напряжении питающей сети, а также до 6 настраиваемых фиксированных частот.

5. Разработаны и исследованы силовые схемы преобразователей векторно-алгоритмического типа для запуска, работы и регулирования угловой скорости трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя от однофазной сети переменного тока. Максимальная мощность электродвигателей, обмотки статора которых соединены по схеме звезда-треугольник (напряжение 220/380

вольт), составляет 2,2 кВт, ток статора до 7 ампер, перегрузочная способность 10 ампер (60 секунд).

6. На основе опытно-экспериментальных исследований механических и энергетических характеристик показано, что трехфазный электродвигатель, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети с помощью разработанного преобразователя, устойчиво работает с моментом на валу равным номинальному; при номинальном моменте на валу электродвигателя скорость на 7% ниже номинальной; электродвигатель выпадает из асинхронного режима при повышении момента на валу более 114% от номинального значения; пусковой и критический моменты составляют 66 и 74% соответственно от номинальных значений; изменение тока, потребляемой электродвигателем из сети полной и активной мощности, коэффициентов полезного действия и мощности не превышает 10%.

7. Чистый дисконтированный доход при использовании электропривода с трехфазным двигателем и разработанным преобразователем, при сопоставлении с электроприводом с однофазным электродвигателем, составляет 2300 рублей. Период окупаемости составляет 1 год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Издания по перечню ВАК

1. Халина, Т. М. Система управления однофазно-трехфазным транзисторным реверсивным коммутатором, ведомым однофазной сетью / Т. М. Халина, М. И. Стальная, **С. Ю. Еремочкин** // Известия горского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 49, №3. – С. 300-304.

2. **Еремочкин, С. Ю.** Алгоритмическая система управления трехфазным асинхронным двигателем / С. Ю. Еремочкин // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2012. – №3. – С. 136-139.

3. Халина, Т. М. Векторно-алгоритмический метод расчета мощности и электромагнитного момента электродвигателя / Т. М. Халина, М. И. Стальная, **С. Ю. Еремочкин** // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – №4. – С. 75-79.

4. **Еремочкин, С. Ю.** Однофазно-трехфазный электропривод для сельскохозяйственных электрифицированных машин / С. Ю. Еремочкин // Аграрный вестник Урала. – 2012. – №7 (99). – С. 49-52.

5. Халина, Т. М. Методика расчета мощности и электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем при векторно-алгоритмическом управлении в условиях сельскохозяйственного производства / Т. М. Халина, М. И. Стальная, **С. Ю. Еремочкин**, А. И. Тищенко // Ползуновский вестник. – 2011. – №2/2. – С. 307-313.

Публикации в других изданиях

6. Khalina, T. M. The rational use of the three phase asynchronous short circuited electric motors in a single phase network / T. M. Khalina, M. I. Stalnaya, **S. Y. Eremochkin** // Proceedings of the VII International Conference on Technical and

Physical Problems of Power Engineering (ICTPE-2011). – 2011. – № 22. – Code 02ERE10. – P. 105-107.

7. Халина, Т. М. Проблемы энергетики при использовании электрической энергии для электропривода сельскохозяйственных машин в отдаленных фермерских хозяйствах / Т. М. Халина, М. И. Стальная, **С. Ю. Еремочкин** // НАН Азербайджана, Баку: Изд-во: ЭЛМ. – Проблемы энергетики. – 2012. – № 1. – С. 37-44.

8. Стальная, М. И. Однофазно-трехфазный транзисторный реверсивный коммутатор, ведомый однофазной сетью для питания трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя от однофазной сети / М. И. Стальная, **С. Ю. Еремочкин** // Электроприводы переменного тока: Труды Международной четырнадцатой научно-технической конференции. – г. Екатеринбург, 12-16 марта 2012. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – 2012. – С. 47-50.

9. Халина, Т. М. Устройство питания трехфазных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей сельскохозяйственных электрифицированных машин от однофазной сети / Т. М. Халина, М. И. Стальная, **С. Ю. Еремочкин** // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 8-й Международной научно-технической конференции – г. Москва, 16-17 мая 2012. М.: ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии, 2012. – Ч. 3. – С. 330-334.

10. Стальная, М. И. Транзисторный реверсивный коммутатор, ведомый однофазной сетью, для запуска и работы трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя от однофазной сети / М. И. Стальная, **С. Ю. Еремочкин** // Междисциплинарные исследования в науке и образовании. – 2012. – № 1 Sp; URL: www.es.rae.ru/mino/157-695 (дата обращения: 09.07.2012).

11. Khalina, T. M., Calculation of electric power and electromagnetic torque of the single-phase asynchronous short circuited motor using vector controlling / T.M. Khalina, M. I. Stalnaya, **S. Y. Eremochkin**, D. Y. Sadovnikov // Proceedings of the VIII International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering (ICTPE-2012, 5-7 September 2012, Fredrikstad, Norway). – 2012. – Number 5. Code 00PLL05. – P. 18-21.

Патенты

12. Однофазно-трехфазный транзисторный реверсивный коммутатор, ведомый однофазной сетью: пат. 109356 Рос. Федерация. № 2011120731/07; заявл. 23.05.2011; опубл. 27.10.2011, Бюл. №30. – 2 с.

13. Однофазный частотный регулятор скорости, ведомый сетью, для трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя: пат. 2461118 Рос. Федерация. № 2011113032/07; заявл. 05.04.2011; опубл. 10.09.2012.

14. Транзисторный биполярный ключ на источнике питания переменного тока: пат. 2465686 Рос. Федерация. № 2011114116/28; заявл. 11.04.2011; опубл. 27.10.2012.

15. Однофазно-трехфазный транзисторный преобразователь частоты, ведомый сетью: пат. 121406 Рос. Федерация. № 2012118444/07; заявл. 03.05.2012; опубл. 20.10.2012.