

На правах рукописи



ХОХЛОВ Дмитрий Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЙ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск-Наукоград РФ
2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет»

Научный руководитель кандидат технических наук, профессор
Набатов Константин Александрович

Официальные оппоненты: **Вахнина Вера Васильевна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет» / кафедра «Электроснабжение и электротехника», заведующий кафедрой

Гришин Иван Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» / кафедра «Электротехника, электрооборудование и автоматика», профессор кафедры

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства»

Защита диссертации состоится 22 мая 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 9-44-12, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МичГАУ и на сайте www.mgau.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации: www.vak.ed.gov.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Михеев Н. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время большинство предприятий агропромышленного комплекса (АПК) подключены к сетям централизованного электроснабжения, характеризующимся значительной протяженностью и низкой надежностью. Для повышения надежности электроснабжения потребителей многие предприятия АПК вынуждены применять традиционные и альтернативные автономные источники различных типов. При этом в большей части существующих вариантов структур систем электроснабжения (СЭС) параллельная работа источников различных типов невозможна. А в тех из них, где такая возможность предусмотрена, для ее обеспечения используются сложные и неэкономичные преобразователи электрической энергии, значительно снижающие коэффициент полезного действия (КПД) СЭС за счет высоких потерь во входящих в их состав мощных полупроводниковых приборах, а также неэффективные системы защиты, что не соответствует в полной мере современным требованиям и условиям бесперебойного электроснабжения предприятий АПК.

Исходя из этого, повышение эффективности СЭС предприятий АПК посредством преобразования их структуры для обеспечения параллельной работы источников электрической энергии любых типов и совершенствования узлов преобразователей является актуальным и имеет научное и практическое значение.

Степень разработанности темы. Общим вопросам построения систем электроснабжения, содержащих автономные источники, посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей: А. Н. Агафонова, Д. Г. Бадрызлова, В. В. Вахниной, В. М. Кузьмина, Б. В. Лукутина, Б. Г. Санеева, P. Bresesti, P. K. Ray, D. J. Lee и др.; особенности применения автономных источников электрической энергии для электроснабжения предприятий АПК рассматриваются в работах: Ю. М. Антонова, А. В. Бажанова, П. П. Безруких, И. И. Гришина, Д. С. Стребкова, В. Ф. Федоренко, N. Lipman, G. Scott и др.

Однако анализ отечественных и зарубежных литературных источников показал, что остаются без должного внимания такие важнейшие вопросы, как обеспечение бесперебойного электроснабжения предприятий АПК посредством параллельной работы нескольких источников различных типов, в том числе альтернативных, снижение возникающих при этом потерь в элементах систем электроснабжения, совершенствование систем защиты от аварийных режимов.

Поэтому разработка новых электротехнологий и электрооборудования для обеспечения бесперебойного электроснабжения предприятий АПК требует дальнейших исследований.

Цель работы – обеспечение экономичного бесперебойного электроснабжения предприятий АПК посредством внедрения усовершенствованных энергетических систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать усовершенствованную структурную схему СЭС с объединенным звеном постоянного тока (ЗПТ) для предприятий АПК;
- исследовать узлы преобразователей электрической энергии СЭС с объединенным ЗПТ для определения возможностей уменьшения энергетических потерь в них;
- разработать новые типы пусковых органов защит ЗПТ СЭС от токовых перегрузок и коротких замыканий (КЗ);
- разработать лабораторные установки для экспериментальных исследований компонентов узлов преобразователей электрической энергии и защит СЭС с объединенным ЗПТ, осуществить необходимые экспериментальные исследования и производственные испытания усовершенствованной структуры СЭС и ее узлов.

Объект исследования – структура СЭС с объединенным ЗПТ и возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов для предприятий АПК.

Предмет исследования:

- СЭС с объединенным ЗПТ и возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов;
- узлы преобразователей электрической энергии СЭС с объединенным ЗПТ;
- узлы защит ЗПТ СЭС от аварийных режимов.

Научная новизна полученных результатов:

- предложена СЭС для предприятий АПК, отличающаяся объединенным ЗПТ и возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов;
- предложен способ коммутации *SCR* тиристоров в цепях постоянного тока, позволяющий использовать их в составе преобразователей электрической энергии СЭС с ЗПТ и отличающийся тем, что тиристор выключается путем подключения дополнительного источника питания, обеспечивающего протекание выходного прямого тока, при этом выключение происходит не за счет изменения тока проводимости, а за счет направленного противоположно току проводимости тока смещения, возникающего при прямом смещении убывающим по амплитуде напряжением коллекторного перехода тиристора;
- разработаны математические модели пусковых органов для узлов защит ЗПТ СЭС: от КЗ, учитывающая тепловой поток рассеяния, и от токовых перегрузок, учитывающая температурные зависимости параметров пускового органа.

Практическая ценность полученных результатов:

- предложена методика определения силы тока, позволяющая определить ее значение по двум измеренным температурам – на оси и на поверхности вставки особой конструкции, при этом отсутствует гальваническая связь с силовыми цепями;

– предложена методика определения силы тока КЗ в электроустановках постоянного тока с учетом теплового потока рассеяния, позволяющая вычислить ее с высокой точностью по измеренным значениям температуры и скорости изменения температуры на оси металлической вставки цилиндрической формы, а также температуры окружающего воздуха;

– разработано программное обеспечение для определения силы тока КЗ с учетом теплового потока рассеяния.

Методы исследования. При выполнении работы были использованы положения теории электрических цепей, теории теплообмена, а также методы математической статистики, математического анализа, имитационного моделирования (в сочетании с численными методами решения) и инженерного эксперимента.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

– структурная схема СЭС с объединенным ЗПТ и возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов для предприятий АПК;

– способ коммутации *SCR* тиристоров, заключающийся в выключении данных приборов путем подключения дополнительного источника питания, обеспечивающего протекание выходного прямого тока, при этом выключение происходит не за счет изменения тока проводимости, а за счет направленного противоположно току проводимости тока смещения, возникающего при прямом смещении убывающим по амплитуде напряжением коллекторного перехода тиристора;

– математическая модель пускового органа для узла защиты ЗПТ СЭС от КЗ, учитывающая тепловой поток рассеяния;

– математическая модель пускового органа для узла защиты ЗПТ СЭС от токовых перегрузок, учитывающая температурные зависимости его параметров.

Реализация результатов исследования:

– результаты проведенных исследований были использованы ООО «ТЭК» при проектировании и монтаже СЭС следующих предприятий АПК: РЦ ЗАО «Тандер» (Тамбовская область, Тамбовский район, с. Стрельцы), ООО «Крупяной завод №1» (Тамбовская область, Рассказово), ООО «Агрокомплекс» (Тамбов), СХПК «Заря» (Пензенская область);

– программное обеспечение для определения тока КЗ с учетом теплового потока рассеяния использовалось ООО «Аркада» при проектировании цепей автономных источников питания для ряда предприятий АПК Тамбовской области;

– методика определения силы тока КЗ в электроустановках постоянного тока с учетом теплового потока рассеяния и способ управления силовыми *SCR* тиристорами током смещения применяются в учебном процессе при подготовке студентов по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» на кафедре «Электроснабжение, электротехника и информаци-

онное обеспечение энергетических систем» ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет».

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность материалов работы подтверждена хорошей сходимостью результатов теоретических исследований с экспериментальными данными лабораторных и производственных испытаний, применением общепринятых методик исследования, современных высокоточных приборов и аппаратуры для проведения измерений. Результаты работы были доложены и обсуждены на XVII Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства» (Тамбов, ГНУ ВНИИТиН, 24–25 сентября 2013 года), Международной научно-практической конференции «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях» (Мичуринск-Наукоград РФ, ФГБОУ ВПО МичГАУ, 10 – 12 ноября 2014 года), кафедральных конференциях ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Публикации. По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 в научных изданиях из перечня, утвержденного ВАК, получено 5 патентов РФ на изобретение, опубликовано 4 доклада в сборниках трудов международных научных конференций. Общий объем публикаций составляет 6,6 печ. л., из которых 3 печ. л. принадлежат лично соискателю.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 214 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка, 11 таблиц, библиографию из 131 наименования и 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель, научная новизна и практическая значимость проведенных исследований.

В первой главе «Современное состояние электроснабжения в агропромышленном комплексе» приведено обоснование актуальности выбранного направления исследований, проведен подробный анализ литературных источников.

Для обоснования актуальности проводимых исследований были рассмотрены экономические предпосылки наблюдаемого в последние годы форсированного развития электроснабжения предприятий АПК с использованием автономных источников электрической энергии. Было показано, что при централизованном электроснабжении в сложившейся рыночной ситуации предприятие АПК несет большие издержки, связанные с особенностями функционирования розничного рынка электрической энергии, а также проблемами в электроснабжении, вызванными существенным износом электрических сетей. Указанные издержки не только существенно увеличивают долю энергоресурсов в структуре затрат при производстве сельскохозяйственной

продукции, но и способны привести к значительному материальному ущербу вследствие возможных срывов технологических процессов, что ведет к увеличению ее себестоимости. Это не только делает продукцию неконкурентоспособной как на внешнем, так и на внутреннем рынке вследствие вступления России в состав Всемирной торговой организации, но и является одним из главных источников социальной напряженности и угрозой продовольственной безопасности страны.

Для выделения основных задач исследования была создана развернутая классификация ключевых эксплуатационных характеристик автономных источников электрической энергии, проанализированы как возможные пути их совершенствования, так и уже достигнутые результаты, рассмотрены вопросы целесообразности их применения в составе СЭС предприятий АПК, а также основные варианты структурных схем СЭС, предлагаемые в настоящее время научным сообществом. На основании результатов аналитического обзора сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе «Предлагаемые направления совершенствования систем электроснабжения предприятий агропромышленного комплекса» был реализован комплексный подход к совершенствованию электротехнической подсистемы СЭС, включающий следующее:

- совершенствование структурной схемы, целью которого явилось создание СЭС с объединенным ЗПТ и возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов;
- повышение энергоэффективности преобразователей электрической энергии СЭС с объединенным ЗПТ;
- обеспечение защит от аварийных режимов СЭС с объединенным ЗПТ.

В работе предложена СЭС с объединенным ЗПТ и возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов, схема которой приведена на рисунке 1.

Основные преимущества предложенной СЭС заключаются в следующем:

- повышение ее эффективности за счет применения перестраиваемой структуры, позволяющей предприятиям АПК работать от источников электрической энергии различных типов, в том числе использующих отходы сельскохозяйственных производств;
- обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей за счет возможности подключения нескольких независимых энергоисточников, включая альтернативные;
- увеличение ресурса работы приводных двигателей внутреннего сгорания традиционных источников электрической энергии за счет исключения режимов, близких к режиму холостого хода.

Проведено исследование возможностей повышения КПД преобразователей электрической энергии из постоянного тока в постоянный и из постоянного тока в переменный (*DC/DC* и *DC/AC* преобразователи), входящих в состав СЭС с ЗПТ.

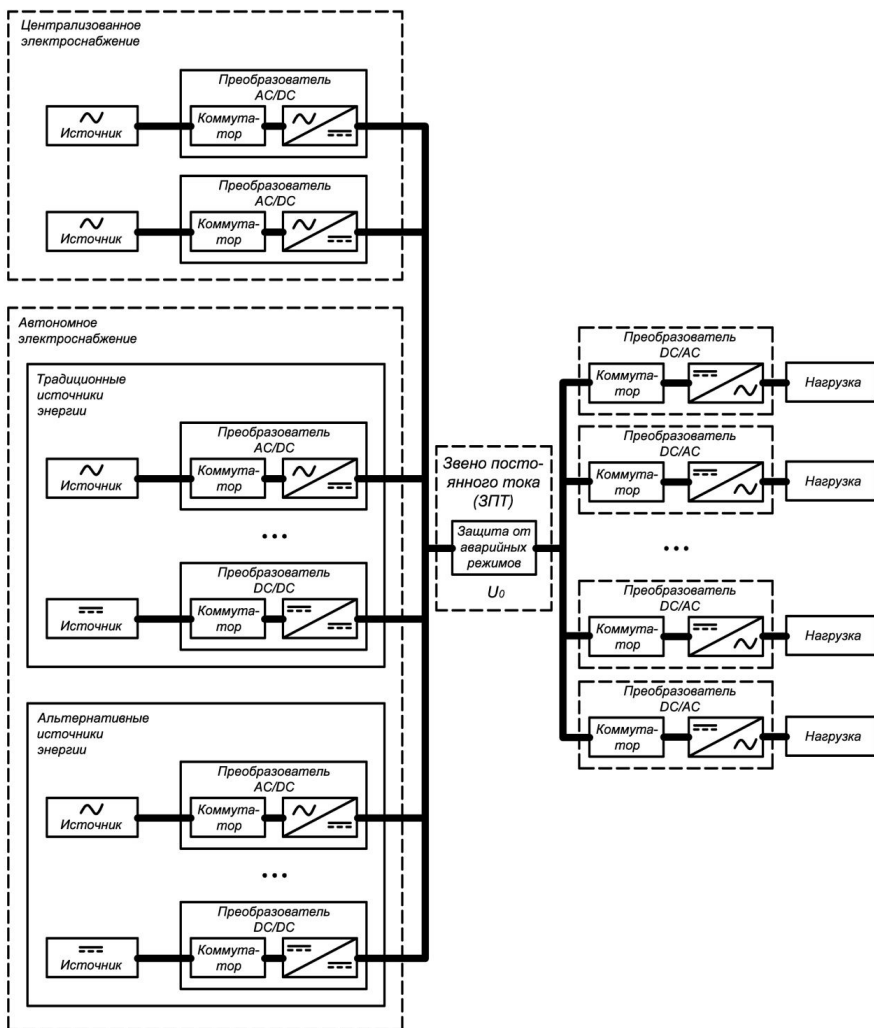


Рисунок 1 – Структура СЭС с объединенным ЗПТ и возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов

Из сравнения семейств полупроводниковых приборов, применение которых возможно в составе рассматриваемых преобразователей (*IGBT* транзистор, а также *SCR*, *GTO*, *GCT* и *IGCT* тиристоры), был сделан вывод, что наиболее высокими эксплуатационными параметрами и КПД обладают традиционные *SCR* тиристоры, которые также имеют и наиболее низкую единичную стоимость.

До настоящего времени широкое распространение *SCR* тиристоров в составе схем *DC/DC* и *DC/AC* преобразователей сдерживалось принципиальной невозможностью запираТЬ данные полупроводниковые приборы по управляющему электроду либо иным способом, обеспечивающим низкое время выключения и, как следствие, низкие возникающие в процессе отключения потери.

Однако в ходе проведенных исследований было установлено, что быстрое и экономичное запираНИЕ *SCR* тиристора, а равно и других полупроводниковых приборов с *p-n-p-n*-структурой, возможно при использовании ряда схемотехнических решений. Был предложен способ коммутации *SCR* тиристора, заключающийся в его выключении путем подключения дополнительного источника питания, обеспечивающего протекание выходного прямого тока, при этом выключение происходит не за счет изменения тока проводимости, а за счет направленного противоположно току проводимости тока смещения, возникающего при прямом смещении убывающим по амплитуде напряжением коллекторного перехода тиристора. Способ поясняется рисунком 2.

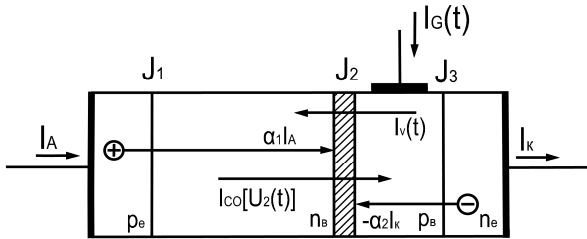


Рисунок 2 – Токи, протекающие в структуре *SCR* тиристора, находящегося в открытом состоянии

При прямом смещении в области пространственного заряда коллекторного перехода J_2 протекают не только конвекционные токи $\alpha_1 I_A$ и $\alpha_2 I_K$ (где I_A – ток анода, I_K – ток катода), образованные встречным движением дырок и электронов, но и ток смещения, вызванный влиянием емкости C_2 :

$$I_V(t) = C_2 \frac{dU_A}{dt}, \quad (1)$$

где $I_V(t)$ – ток смещения; U_A – анодное напряжение тиристора.

Ток смещения учитывает перезаряд емкости C_2 запирающего слоя перехода J_2 , при этом емкостной ток через запирающие емкости переходов J_1 и J_3 достаточно мал, и им можно пренебречь. Следовательно, ток смещения при протекании через переходы J_1 и J_3 является током инжекции. Отсюда следует, что выражение для анодного тока тиристора (при условии

пренебрежения явлением умножения носителей заряда в запирающем слое перехода J_2) имеет вид

$$I_A(t) = \frac{I_{CO}[U_2(t)] + I_V(t) + \alpha_2 I_G(t)}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (2)$$

где $I_{CO}[U_2(t)]$ – зависимость полного тока обратносмещенного коллекторного перехода от прямого падения напряжения на переходе J_2 ; $I_V(t)$ – ток смещения; $I_G(t)$ – ток управляющего электрода; α_1, α_2 – малосигнальные коэффициенты передачи тока в схеме с общей базой. Из выражения (2) с учетом (1) следует, что при убывающем анодном напряжении $\frac{dU_A}{dt} < 0$ возможно надежное выключение тиристора током $I_V(t)$ смещения. Для этого, в общем случае, необходимо выполнение условия

$$\frac{-I_V(t) + I_{CO}[U_2(t)]}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} < I_{уд}, \quad (3)$$

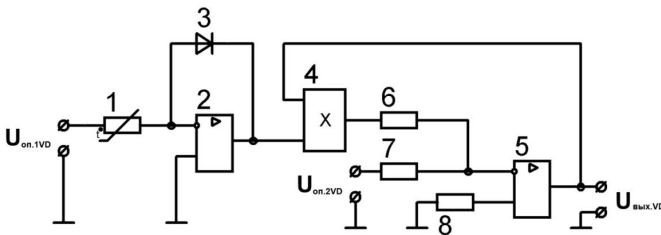
где $I_{уд}$ – ток удержания.

Таким образом, показано, что полупроводниковые *SCR* тиристоры обладают свойством полной управляемости под влиянием тока смещения и, следовательно, могут быть применены в составе *DC/DC* и *DC/AC* преобразователей, что позволяет значительно повысить их КПД (*SCR* тиристоры имеют КПД до 99%, в то время как полупроводниковые приборы других рассмотренных типов обладают более низким КПД 95...98%) и снизить энергетические потери в них в 2 – 5 раз. Дополнительным преимуществом способа является то, что при выключении принудительно выводятся не только дырки, но и электроны, т.е. время выключения определяется временем перезаряда емкости C_2 и сравнимо со временем включения тиристора, что меньше времени выключения тиристора при использовании любого из известных способов.

В работе предложены эффективные защиты ЗПТ СЭС от токовых перегрузок (включая перегрев токопроводов) и КЗ. Согласно нормативным документам ЗПТ должно быть защищено от всех вышеуказанных аварийных режимов. Однако организация его защиты с использованием трансформаторов тока и напряжения невозможна, а существующие варианты (плавкие предохранители, автоматические выключатели с тепловыми, комбинированными и полупроводниковыми расцепителями, системы защиты на базе датчиков Холла) применимы лишь для ограниченного диапазона токов и напряжений. Кроме того, простейшие из них (плавкие предохранители, автоматические выключатели с тепловыми и комбинированными расцепителями) имеют, как правило, значительный разброс характеристик срабатывания по току и времени, невысокую их стабильность в процессе эксплуатации, а также невозможность обеспечения однозначно заданного времени отключения. Более сложные (автоматические выключатели с полупроводниковыми расцепителями)

ми, системы защиты на базе датчиков Холла) имеют значительную стоимость, сложность и низкую ремонтопригодность. Исходя из вышесказанного, было принято решение о необходимости создания эффективного блока защит ЗПТ СЭС от аварийных режимов.

Рассмотрим предлагаемую в работе защиту ЗПТ от перегрева токопроводов, являющуюся резервной защитой от перегрузки. В качестве пускового органа предложенной защиты используется специально разработанное измерительное устройство, принципиальная схема которого представлена на рисунке 3. Чувствительным элементом является терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), встраиваемый непосредственно в токопровод. В работе рассмотрены также способы усовершенствования разработанного пускового органа для обеспечения большей точности измерений, в частности, предложены варианты применения в составе логарифмирующего усилителя вместо диода биполярного транзистора, включенного по схеме с заземленной базой или диодной схеме.



1 – датчик (терморезистор с отрицательным ТКС); 2, 5 – операционные усилители; 3 – полупроводниковый диод; 4 – интегральный аналоговый перемножитель; 6, 7, 8 – постоянные резисторы.

Рисунок 3 – Принципиальная схема пускового органа защиты ЗПТ от перегрева токопроводов

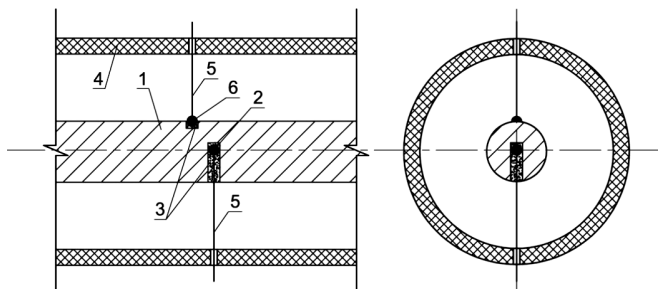
Важным преимуществом пускового органа, приведенного на рисунке 3, является возможность производить измерение температуры в одной точке одним терморезистором с отрицательным ТКС при линейной характеристике преобразования, что позволяет использовать его в качестве универсального измерительного датчика с выходным напряжением:

$$U_{\text{Вых.VD}} = C(T_a + \theta_T), \quad (4)$$

где C – масштабный коэффициент, подбираемый таким образом, чтобы диапазон значений величины $U_{\text{Вых.VD}}$ соответствовал входному диапазону применяемого в составе блока управления СЭС компаратора или аналого-цифрового преобразователя; T_a – температура в точке нахождения терморезистора по шкале Кельвина; θ_T – температурная постоянная по шкале Кельвина, обеспечивающая более точный расчет функции $\rho(T_a)$.

Кроме того, он обладает сниженной относительно прототипов и аналогов стоимостью, простотой схемотехнических решений, отсутствием необходимости подбора терморезисторов и, как следствие, высокой надежностью и ремонтопригодностью.

Рассмотрим предлагаемую в работе защиту ЗПТ от токовой перегрузки. Если в состав токопроводов ЗПТ ввести металлические вставки специальной конструкции (рисунок 4), а также пару пусковых органов (см. рисунок 3) таким образом, что в центре и на поверхности каждой вставки расположить по одному чувствительному элементу – бусинковому терморезистору с отрицательным ТКС, то возможно измерение установившегося значения силы тока, протекающего в токопроводе ЗПТ. Данный подход может быть применен также для организации измерительных каналов.



1 – металлическая вставка;

2 – первый датчик (терморезистор с отрицательным ТКС);

3 – теплопроводящий полимер; 4 – оболочка; 5 – проводники от датчика;

6 – второй датчик (терморезистор с отрицательным ТКС).

Рисунок 4 – Предлагаемая конструкция вставки – элемента пускового органа защиты ЗПТ от токовых перегрузок

Сила тока может быть найдена из предложенной математической модели, учитывающей температурные зависимости параметров пускового органа в соответствии с изложенной в работе методикой согласно выражениям (5) – (7):

$$D = D_{300} (1 + \alpha_{\text{вст}}) \left(\frac{T_a + T_s}{2} - T_{\text{оп}} \right), \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{вст}}$ – коэффициент линейного теплового расширения материала вставки; D_{300} – диаметр вставки при опорной температуре $T_{\text{оп}}$, принятой 300 К.

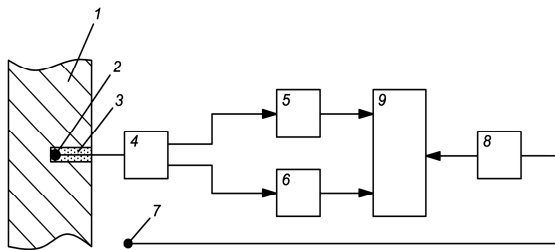
$$d = d_{300} (1 + \alpha_{\text{вст}}) \left(\frac{T_a + T_s}{2} - T_{\text{оп}} \right), \quad (6)$$

где d_{300} – диаметр выемки под датчик при опорной температуре $T_{\text{оп}}$.

$$I = \left[\frac{4\pi}{1,65519 \cdot 10^{-8} \left(\frac{T_a + T_s}{2T_{\text{оп}}} \right)^{1,18971} \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{D^2}{4} \arcsin \left(\frac{d}{D} \right) \right)} - \right. \\ \left. - \frac{dD}{4} \cos \left(\arcsin \left(\frac{d}{D} \right) \right) - \frac{d^2}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} - \frac{d^2}{8} \left(\frac{1}{\sin \varphi} - \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \right]^{0,5} \times \\ \times \left[\left(-0,62780 \left(\frac{T_a + T_s}{2T_{\text{оп}}} \right)^3 + 4,61748 \left(\frac{T_a + T_s}{2T_{\text{оп}}} \right)^2 - \right) (T_a - T_s) \right. \\ \left. - \left(-33,67010 \left(\frac{T_a + T_s}{2T_{\text{оп}}} \right) + 430,93356 \right) \right]^{0,5}, \quad (7)$$

где φ – угол при вершине сверла, которым изготавливается отверстие под датчик; T_a – температура на оси вставки по шкале Кельвина, измеряемая первым датчиком; T_s – температура поверхности вставки по шкале Кельвина, измеряемая вторым датчиком.

Рассмотрим предлагаемую защиту ЗПТ от КЗ. По конструкции она подобна защите ЗПТ от токовых перегрузок, но в качестве чувствительных элементов в данном случае применяются две термопары, подключенные к входам предложенного в работе преобразователя температуры с частотным выходом и известного устройства для измерения и сигнализации скорости изменения температуры с частотно-импульсным выходом соответственно. Структурная схема предлагаемой защиты приведена на рисунке 5.



- 1 – металлическая вставка; 2, 7 – датчики (термопары); 3 – теплопроводящий диэлектрический компаунд; 4 – блок разделения сигнала;
5, 8 – преобразователи температуры с частотным выходом;
6 – устройство для измерения и сигнализации скорости изменения температуры; 9 – вычислительное устройство.

Рисунок 5 – Структурная схема пускового органа системы защиты ЗПТ от КЗ

В работе показано, что значение тока КЗ, протекающего через вставку, и, следовательно, через проводник, в который она установлена, в произвольный момент времени может быть найдено из предложенной математической модели пускового органа защиты ЗПТ от КЗ, учитывающей тепловой поток рассеяния:

$$\begin{aligned}
 & -j_k^2 + c_v(T_a)\sigma(T_a)\gamma(T_a)\frac{\partial T_a}{\partial t} - \frac{4\sigma(T_a)}{d_{\text{вст}}}\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T_a)\frac{\partial T_a}{\partial x} + \right. \\
 & \left. + j_k T_a S(T_a)\right) + \frac{2,16\sigma(T_a)\lambda^A(T_0)\lambda^A(T_m)}{d_{\text{вст}}}\left(\frac{d_{\text{вст}}^3 g}{\nu^A(T_0)a^A(T_0)}\right)^{0,25} \times \\
 & \times \left(\frac{T_a - T_0}{(T_m + T_0)\nu^A(T_m)a^A(T_m)}\right)^{0,25} (T_a - T_0) + \frac{4\sigma(T_a)}{d_{\text{вст}}}\sigma_{\text{сб}}T_a^4\varepsilon(T_a) = 0,
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $j_k(t)$ – величина тока КЗ; T_a – температура на оси проводника по шкале Кельвина; T_0 – температура окружающей среды; $T_m = (T_a + T_0)/2$; $d_{\text{вст}}$ – диаметр вставки; γ – плотность материала проводника; λ – коэффициент теплопроводности материала проводника; σ – электрическая проводимость материала проводника; S – абсолютное значение термоэдс; λ^A , ν^A , a^A – коэффициент теплопроводности, кинематическая вязкость и коэффициент температуропроводности для воздуха; $\sigma_{\text{сб}}$ – постоянная Стефана–Больцмана; ε – степень черноты материала вставки; c_v – удельная изобарная теплоемкость; g – ускорение свободного падения.

Граничные условия определяются из условия равенства температуры вставки на ее концах и температуры окружающей среды:

$$T_a|_{x=0} = T_a|_{x=l} = T_a, \tag{9}$$

$$T_a(x,0) = T_0. \tag{10}$$

Результатом реализации комплексного подхода к совершенствованию электротехнической подсистемы СЭС предприятий сельского хозяйства стало повышение ее эффективности и эксплуатационных характеристик.

В третьей главе «Программа и методики экспериментальных исследований» изложены задачи и методики экспериментальных исследований, описаны экспериментальные установки и оборудование, применяемое для проведения лабораторных испытаний, представлены методики обработки опытных данных.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приводятся результаты:

- проверки способа управления *SCR* тиристорами током смещения;
- экспериментальных исследований защиты ЗПТ от КЗ.

Для проверки способа управления *SCR* тиристорами током смещения была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 6.

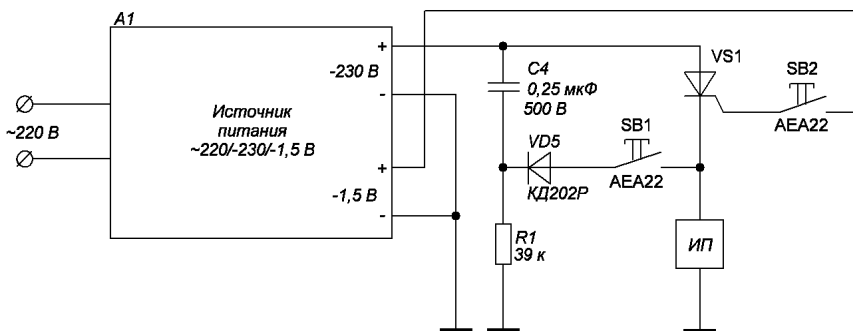


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки для проверки предложенного способа управления *SCR* тиристорами

При проведении эксперимента был использован *SCR* тиристор *VS1* типа ТЧ40-9-374. С целью исключения зависимости результатов эксперимента от конкретного экземпляра тиристора *VS1*, были проверены также *SCR* тиристоры типов ТЧ25-9-374 и ТБ151-50-9. Во всех случаях достигалась уверенная их коммутация током смещения, о чем можно было судить по показаниям измерительного прибора ИП. Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил работоспособность предлагаемого способа коммутации *SCR* тиристоров в цепях постоянного тока и, следовательно, возможность их использования в составе схем *DC/DC* и *DC/AC* преобразователей.

Для исследования защиты ЗПТ от КЗ была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 7, при этом была предложена оригинальная методика снятия показаний.

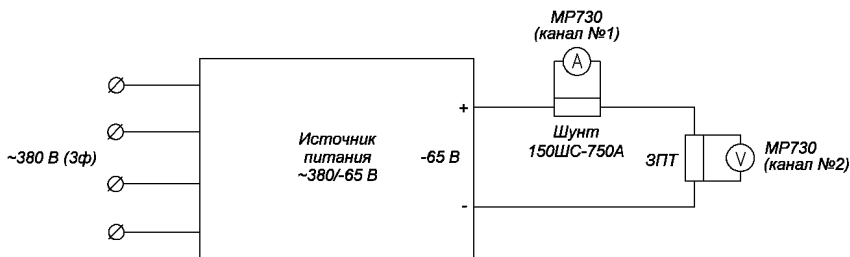


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки для исследований защиты ЗПТ от КЗ

В ходе эксперимента были использованы следующие материалы и оборудование: в качестве модели вставки – круглая медная токоведущая жила сечением 6 мм^2 с длиной рабочего отрезка 150 мм ; в качестве источника электрической энергии – выпрямитель ВД-313У3; для измерений – двухканальный вольтметр-регистратор МР730 (диапазон измерений $0 \dots 7,5 \text{ В}$; относительная погрешность измерений без калибровки – не более 1%) с доработанной приставкой-усилителем $\times 50/\times 3$ и шунт 150ШС-750А класса точности $0,5$. Регистрация температуры поверхности ЗПТ осуществлялась тепловизором SAT Infrared SDS HotFind-VR с температурным расширением $-20/1500$ (погрешность $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ или $\pm 2\%$ – выбирается большая из указанных величин).

По результатам эксперимента были построены графики изменений расчетных и экспериментальных значений силы тока КЗ в ЗПТ, падения напряжения на вставке, абсолютной температуры в центре вставки, а также величины тепловой мощности, выделяющейся при протекании тока КЗ в ЗПТ, включая компоненты теплового потока рассеяния, во времени. Данные графики приведены на рисунках 8 – 11 соответственно.

Из анализа рисунков 8 – 10 следует, что экспериментальные данные совпадают с результатами моделирования (отличие не превышает 5%), что позволяет сделать вывод о высокой точности предложенной математической модели процесса протекания тока КЗ в ЗПТ с учетом потока рассеяния (8) – (10) и, таким образом, возможности создания на базе предложенного пускового органа систем защиты от КЗ класса точности 5 .

Анализ данных, представленных на рисунке 11, показывает, что с ростом температуры ЗПТ тепловой поток рассеяния оказывает все более возрастающее влияние на тепловыделение, достигая величин порядка $2,9 - 3\%$. В связи с этим можно сделать вывод, что учет теплового потока рассеяния позволяет дополнительно повысить точность предложенного в работе пускового органа системы защиты ЗПТ от КЗ на величину до 3% .

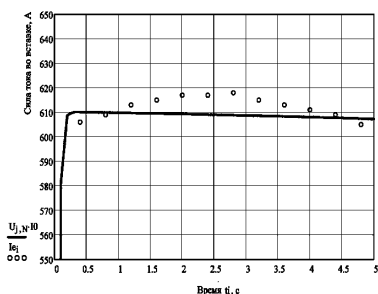


Рисунок 8 – Графики изменения тока КЗ в ЗПТ во времени (сплошная линия – модель; точки – экспериментальные значения)

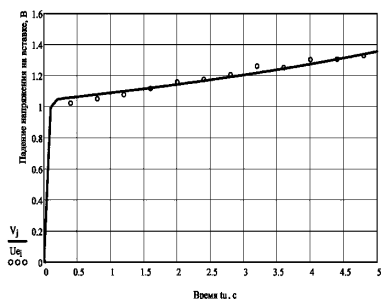


Рисунок 9 – Графики изменения падения напряжения на вставке во времени (сплошная линия – модель; точки – экспериментальные значения)

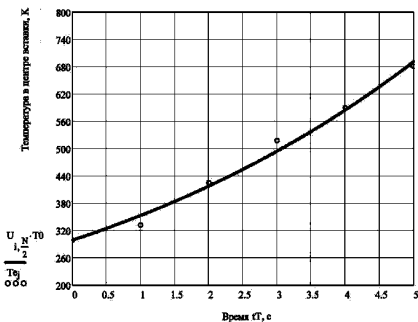


Рисунок 10 – Графики изменения абсолютной температуры в центре вставки во времени (сплошная линия – модель; точки – экспериментальные значения)

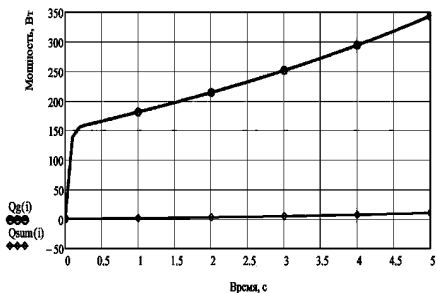


Рисунок 11 – Графики изменения величины тепловой мощности, выделяющейся при протекании тока КЗ в ЗПТ во времени (кружлыми маркерами обозначено джоулево тепло; ромбовидными – тепловой поток рассеяния)

В пятой главе «Производственные испытания и технико-экономические исследования» представлены результаты производственных испытаний предложенной СЭС на предприятии АПК и ее технико-экономические показатели, из анализа которых можно сделать вывод о комплексном повышении ее эффективности. Так, на крупном предприятии по хранению и переработке сельскохозяйственной продукции (расчетная мощность – 640 кВт) по сравнению с централизованным энергоснабжением внедрение предложенной СЭС позволяет добиться годового экономического эффекта более 11 млн. р. при сроке окупаемости 2,17 года только за счет экономии средств на оплату электрической и тепловой энергии, при этом обеспечение бесперебойного электроснабжения от предложенной СЭС гарантированно позволяет избежать возможного ущерба более 15 млн. р. вследствие порчи сельскохозяйственной продукции, хранящейся в распределительных холодильниках. В то же время на удаленном предприятии (лагерь крупного рогатого скота на 180 голов), обладающем незначительной расчетной мощностью электрооборудования (11,6 кВт) по сравнению с электроснабжением от бензиновых генераторов возможно получение экономического эффекта более 144 тыс. р. за пастбищный сезон при сроке окупаемости 2,32 года только за счет экономии средств на закупку топлива, при этом обеспечение бесперебойного электроснабжения от предложенной СЭС гарантированно позволяет избежать возможного ущерба более 5 млн. р. вследствие заболеваний поголовья по причине нарушения технологического процесса доения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана структурная схема усовершенствованной СЭС с объединенным ЗПТ для предприятий АПК, обеспечивающей экономичное бесперебойное электроснабжение и обладающей возможностью совместного использования источников электрической энергии любых типов.

2. Проведено исследование узлов преобразователей электрической энергии СЭС с объединенным ЗПТ для определения возможностей уменьшения энергетических потерь в них, по результатам которого предложен и экспериментально доказан новый способ коммутации *SCR* тиристоров за счет тока смещения, позволяющий использовать их в составе *DC/DC* и *DC/AC* преобразователей электрической энергии СЭС. При этом энергетические потери по сравнению с наиболее распространенными преобразователями на основе *IGBT* транзисторов могут быть уменьшены в 2 – 5 раз, а по сравнению с наиболее дорогостоящими преобразователями на основе *GTO*, *GCT* и *IGCT* тиристоров – в 2 раза. Предложенный способ также может быть применен и в других преобразователях, широко распространенных в сельском хозяйстве (сварочные инверторы, электропривод и т.д.).

3. Разработаны пусковые органы защит ЗПТ от токовых перегрузок и КЗ, обладающие значительными преимуществами в сравнении с аналогами. Составлены их математические модели, учитывающие соответственно температурные зависимости параметров и тепловой поток рассеяния, что повышает точность измерений на величину до 3%.

4. Предложены методики: определения силы тока, позволяющая найти ее значение по двум измеренным температурам – на оси и на поверхности вставки особой конструкции, и определения силы тока КЗ в электроустановках постоянного тока с учетом теплового потока рассеяния, позволяющая вычислить ее с высокой точностью по измеренным значениям температуры и скорости изменения температуры на оси металлической вставки цилиндрической формы, а также температуры окружающего воздуха.

5. Экспериментально установлена высокая точность разработанного пускового органа защиты ЗПТ от КЗ, достаточная для ее работы в нормируемом классе точности 5.

6. Результаты производственных испытаний показали, что предлагаемый в работе комплексный подход к совершенствованию СЭС предприятий АПК позволяет обеспечить их экономичное бесперебойное электроснабжение и избежать возможного материального ущерба, который может возникнуть вследствие длительных перебоев в подаче электрической энергии. При этом затраты на энергоснабжение за срок эксплуатации СЭС могут быть снижены на величину до 64%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня, утвержденного ВАК:

1. Хохлов, Д. Ю. Выбор полупроводниковой элементарной базы силовых преобразователей автономных систем электроснабжения, содержащих звенья постоянного тока / Д. Ю. Хохлов, К. А. Набатов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 1083 – 1088.

2. Хохлов, Д. Ю. Энергосбережение в электроприводе при питании его от автономной системы электроснабжения / К. А. Набатов, Д. Ю. Хохлов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 1089 – 1093.

3. Хохлов, Д. Ю. Автономная система электроснабжения с перестраиваемой структурой, основанная на совместном применении альтернативных и традиционных источников энергии / Д. Ю. Хохлов, К. А. Набатов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 458 – 466.

4. Хохлов, Д. Ю. Система защиты электроустановок постоянного тока от коротких замыканий с частотно-импульсным представлением информации / Д. Ю. Хохлов, А. И. Фесенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 755 – 761.

Описания к изобретениям

5. Пат. 2451913 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 K 7/22. Устройство для измерения температуры / А. И. Фесенко, И. Н. Ищук, К. А. Набатов, Д. Ю. Хохлов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2010153002/28 ; заявл. 23.12.2010 ; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15. – 6 с.

6. Пат. 2461804 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 K 7/16. Преобразователь температуры / А. И. Фесенко, И. Н. Ищук, К. А. Набатов, Д. Ю. Хохлов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2011120666/28 ; заявл. 20.05.2011 ; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26. – 7 с.

7. Пат. 2461913 Российская Федерация, МПК⁷ H 01 L 29/74. Способ выключения незапираемого тиристора / Н. П. Поморцев, А. И. Фесенко, К. А. Набатов, Д. Ю. Хохлов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2011117396/28 ; заявл. 29.04.2011 ; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26. – 8 с.

8. Пат. 2486482 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 K 7/20. Устройство для измерения температуры / А. И. Фесенко, К. А. Набатов, Д. Ю. Хохлов, В. А. Пручкин ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2012102663/28 ; заявл. 25.01.2012 ; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18. – 5 с.

9. Пат. 2504743 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 K 7/02. Цифровой измеритель температуры / А. И. Фесенко, К. А. Набатов, Д. Ю. Хохлов ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2012128239/28 ; заявл. 04.07.2012 ; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2. – 6 с.

Доклады международных научных конференций

10. Хохлов, Д. Ю. Повышение энергоэффективности сварочных преобразователей инверторного типа путем применения SCR тиристорov в силовой электрической схеме / Д. Ю. Хохлов, К. А. Набатов, А. И. Фесенко // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для

растениеводства и животноводства : сб. научных докладов XVII Международной научно-практической конференции, (24–25 сентября 2013 года). – Тамбов : Издательство Першина Р. В., 2013. – С. 186 – 189.

11. Хохлов, Д. Ю. Анализ энергоэффективности воздушных линий электропередачи, выполненных самонесущими изолированными проводами / Д. Ю. Хохлов, К. А. Набатов, А. И. Фесенко // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства : сб. научных докладов XVII Международной научно-практической конференции, (24–25 сентября 2013 года). – Тамбов : Издательство Першина Р. В., 2013. – С. 189 – 192.

12. Хохлов, Д. Ю. Совершенствование аналогового линейного датчика температуры для устройств автоматики / Д. Ю. Хохлов, К. А. Набатов // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Международной научно-практической конференции (10 – 12 ноября 2014 года). – Мичуринск : Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. – С. 286 – 289.

13. Хохлов, Д. Ю. К вопросу о коммутации однооперационных тиристоров в составе управляемых преобразователей электрической энергии током смещения / Д. Ю. Хохлов, К. А. Набатов // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Международной научно-практической конференции (10 – 12 ноября 2014 года). – Мичуринск : Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. – С. 321 – 326.

Подписано в печать 16.03.2015.
Формат 60 × 84 /16. 1,16 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 3

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08. E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

