

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Нижний Новгород 2019

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. № 4 (8). – 119 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков канд. техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

гл. редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ХРОНИКИ	4
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	6
Вуколов В.Ю., Петров А.А., Горшкова Д.М., Симонова Е.В. Особенности реализации микропроцессорной релейной защиты от дуговых замыканий ячеек секции напряжением 0,4-35 кВ	6
Ефимов А.Ю., Молоков А.О., Артемов И.Н. Снижение потерь путем перехода в распределительных сетях 6/10 кВ на более высокое напряжение 20 кВ	17
Кочеганов Д.М., Серебряков А.В. Система оценки качества функционирования преобразователя частоты с использованием нечеткой логики	27
Бурмакин О.А., Гуляев В.В., Попов С.В., Андреев Г.А. Применение Matlab Simulink для исследования режимов работы судовой электроэнергетической системы	35
Жилин Е.В., Абдулваххаб М.В. Особенности влияния распределенной генерации на потокораспределение в электрических сетях Ирака	44
Калинин Е.В., Чивенков А.И. Резкий поверхностный эффект в стыках шихтованных сердечников силовых трансформаторов	52
Смирнов А.Ю., Чеботарь В.И., Кузнецова Л.В. Разработка электромагнитного ретрактора для использования в пластической хирургии	68
Терентьев П.В., Филатов Д.А., Захаров А.Ю., Симонов А.С. Рассмотрение различных схем подключения энергоустановок на основе фотоэлектрических солнечных модулей для повышения энергоэффективности электротехнических комплексов объектов сельской местности	79
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	91
Алешин Д.А., Вихорев Н.Н. Двухканальный безмостовой выпрямитель	91
Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Кралин А.А., Ермолаев А.И. Измерение пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток магнитоупругих датчиков крутящего момента с помощью широкополосной частотной модуляции генераторов качающейся частоты	100
Наши авторы	114

ХРОНИКИ

КАФЕДРЕ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» НГТУ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА – 55 ЛЕТ

В 2019 г. кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева исполняется 55 лет. Основателем кафедры, образованной в 1964 г. под названием «Электроснабжение промышленных предприятий и городов», был видный советский электроэнергетик, профессор Юрий Леонидович Мукосеев (1905-1976). Возглавляя в течение многих лет научно-методическую комиссию Министерства образования СССР по специальности «Электроснабжение», он стал инициатором открытия данного направления подготовки более чем в шестидесяти вузах страны. В 1951 г. Ю.Л. Мукосеевым опубликована первая в СССР книга по электроснабжению «Вопросы электроснабжения промышленных предприятий», переведенная впоследствии на многие языки мира. В 1973 г. издан его учебник для вузов «Электроснабжение промышленных предприятий».

После смерти профессора Ю.Л. Мукосеева в 1976 г. кафедру возглавил его ученик – профессор Геннадий Яковлевич Вагин, заведовавший ею до конца 1993 г. В 1989 г. он стал лауреатом премии Академии наук в области энергетики за цикл работ по электроснабжению электротехнологических установок. За разработку проектов мини-ТЭЦ нового поколения в 2010 г. Г.Я. Вагин был награжден медалью «Инженерная слава». С декабря 1993 г. по декабрь 2017 г. кафедрой руководил профессор Алексей Борисович Лоскутов, работы которого по экономии энергоресурсов в образовательных учреждениях отмечены в 2003 г. Государственной премией Правительства РФ.

В 2001 г. на основе объединенных кафедр «Электроэнергетика» и «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» была создана кафедра «Электроэнергетика и электроснабжение». В 2013 г. на базе кафедр «Электроэнергетика и электроснабжение» и «Промышленная электроника» была создана кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

С января 2018 г. кафедрой «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» руководит доцент, к.т.н. Александр Александрович Севостьянов. В настоящее время на кафедре работает 21 преподаватель, в

том числе: 5 докторов технических наук, 11 кандидатов технических наук, 3 старших преподавателя, 1 ассистент.

Кафедра осуществляет подготовку бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». За 55 лет выпущено более 5 000 специалистов, разработано более 30 спецкурсов для бакалавров и магистров. Кафедра имеет 10 лабораторий, оснащенных современным оборудованием. Активно развиваются следующие научные направления: энергосбережение в промышленности, бюджетной сфере и ЖКХ, электромагнитная совместимость и качество электроэнергии, интеллектуальные электрические сети и подстанции, распределенная энергетика и возобновляемые источники энергии, методы и средства цифровой релейной защиты и автоматики. По данным направлениям сотрудниками кафедры опубликовано около тысячи статей, докладов и тезисов, двадцать монографий, получено более сорока патентов на изобретения. Кандидатские диссертации защитили более тридцати выпускников кафедры, девять стали докторами наук.

Сотрудники кафедры регулярно представляют результаты своих исследований на российских и зарубежных конференциях высокого уровня. Научная работа ведется на основе тесного взаимодействия с промышленными предприятиями, проектными и исследовательскими организациями, ФСК и МРСК Центра и Приволжья.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311

В.Ю. Вуколов¹, А.А. Петров²,
Д.М. Горшкова¹, Е.В. Симонова¹

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ ЯЧЕЕК СЕКЦИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4-35 КВ

¹ Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

² АО «Научно-исследовательское предприятие общего машиностроения»

Рассмотрены вопросы повышения надежности электроснабжения на напряжении 0,4-35 кВ путем разработки быстродействующей и чувствительной микропроцессорной дуговой защиты. Принцип действия датчиков дугового замыкания основан либо на измерении возникающих термических или ударных воздействий, либо на выявлении одного из свойств оптического излучения, выделяемого вспышкой электрической дуги. При определении места возникновения дугового замыкания в пределах распределительного устройства подстанции целесообразно использовать дуговую защиту с волоконно-оптическим датчиком. Различают распределенные и централизованные дуговые защиты. Основным преимуществом распределенной дуговой защиты является существенное упрощение монтажа и послеаварийного обслуживания. Для реализации функции контроля тока требуется наличие в терминале дуговой защиты аналого-цифрового преобразователя, что существенно увеличивает стоимость устройства. Централизованные дуговые защиты являются более дешевым и экономически эффективным вариантом.

Ключевые слова: дуговая защита, микропроцессорная релейная защита, надежность.

1. Введение

Распределительные устройства (РУ) 0,4-35 кВ, составляющие основу формирования распределительных электрических сетей, устанавливаются, главным образом, в закрытых помещениях (ЗРУ) или изолированных камерах, т.е., являются закрытыми электроустановками. Особенность кон-

струкции РУ данных напряжений заключается в том, что токоведущие части в них имеют воздушную изоляцию и малые габариты, поэтому при возникновении дугового короткого замыкания (ДЗ) подвергаются значительным термическим и динамическим воздействиям. Горение электрической дуги через интервал времени 10 мс после возникновения ДЗ характеризуется максимумом ударной волны (разрушение электрооборудования), через 100 мс начинается плавление концевой заделки кабелей, через 150-200 мс происходит плавление меди и плавление стали. Помимо материальных потерь, возможна серьезная угроза здоровью и жизни персонала, обслуживающего ячейку.

Данные факторы определяют необходимость разработки быстродействующей и чувствительной микропроцессорной дуговой защиты (ДгЗ), позволяющей надежно определять факт и место возникновения ДЗ в пределах РУ подстанций и обеспечить селективное отключение поврежденного участка сети за счет согласования с подстанционными защитами, выполненными на ином принципе.

II. Регистрация дуговых замыканий

Отличительная особенность устройств ДгЗ – чувствительные измерительные органы, датчики дугового замыкания, предназначенные для фиксации появления электрической дуги. Принцип действия датчиков основан либо на измерении возникающих термических или ударных воздействий, либо на выявлении одного из свойств оптического излучения, выделяемого вспышкой электрической дуги [1]:

- плотность мощности оптического излучения может достигать до 10 кВт/м²;
 - спектр оптического излучения индивидуален и характеризуется сложной формой (большая его часть сосредоточена в диапазоне длин волн от 300 до 800 нм);
 - зависимость амплитуды мощности от времени имеет периодический характер с периодом $T = 0,01$ с при частоте напряжения сети 50 Гц (амплитуда при этом может изменяться в широких пределах).
- Выделяют следующие виды датчиков фиксации ДЗ:
- 1) температурные (реагируют на повышение температуры);
 - 2) антенные (контролируемый параметр – степень ионизации);
 - 3) клапанного типа (в качестве датчика используются клапаны с путевыми выключателями, реагирующие на изменение давления внутри камеры вследствие горения дуги);
 - 4) фототиристорные (ФТД – фиксирует световую вспышку электрической дуги);
 - 5) волоконно-оптические (ВОД – также реагирует на свечение дуги).

По способу измерения контролируемого параметра температурные датчики подразделяются на контактные и дистанционные. Применение дистанционных затруднено из-за необходимости обеспечения точного расположения датчика по отношению к столбу дуги, положение которого заранее неизвестно [2]. Контактные датчики имеют ограниченный диапазон измерения температуры и обладают инерционностью, поэтому возможности их применения также ограничены.

Антенные датчики, определяющие плотность заряженных частиц при возникновении дуги [3, 4] для обеспечения быстродействия и чувствительности ДгЗ, так же, как и температурные, необходимо устанавливать вблизи места КЗ (расстояние до столба дуги не более 10 см). Такую систему ДгЗ возможно реализовать лишь при использовании большого количества датчиков, расположенных вблизи ошиновки РУ. При этом к датчикам предъявляются повышенные требования по термической стойкости, что делает такую ДгЗ дорогостоящей и малоэффективной.

ДгЗ, построенная на датчиках клапанного типа, тоже имеет существенные недостатки:

- срабатывание клапанного датчика происходит при возникновении избыточного давления, достигаемого при длительном горении дуги в течение 100-500 мс, что может привести к частичному повреждению оборудования и загрязнению ячейки продуктами горения;
- для корректной работы датчиков клапанного типа необходимо обеспечить герметичность камеры, в которой находится датчик, что представляет дополнительную сложность производства комплектных и, особенно, стационарных РУ;
- несрабатывание датчика при малых токах коротких замыканий (КЗ) из-за недостаточного давления (опыт эксплуатации такого оборудования в качестве пороговой границы определяет значение тока ниже 3,5кА).

По этим причинам в настоящее время датчики клапанного типа не используются. Широкое распространение получила ДгЗ с датчиками, регистрирующими изменение световой вспышки в защищаемом отсеке (ФТД и ВОД).

Основным компонентом ФТД является фототиристор либо иной полупроводниковый фотоэлемент (фотодиод, фоторезистор, фототранзистор). Такой датчик устанавливается непосредственно в защищаемый отсек РУ, и при возникновении ДЗ в зоне чувствительности датчика через фотоэлемент начинает протекать ток. Электрическая природа ФТД позволяет увеличить быстродействие ДгЗ, поскольку в устройстве защиты не требуется преобразование светового сигнала в электрический. Данный тип

датчиков имеет относительно небольшой угол «захвата» (в районе 60°), что делает его применение ограниченным из-за возможности затемнения и, следовательно, необходимости применения большего количества данного типа датчиков в защищаемом отсеке. Кроме того, электронные компоненты ФТД располагаются непосредственно в защищаемом отсеке, что делает их подверженными электромагнитным воздействиям. Указанные недостатки приводят к снижению надежности ДгЗ, построенных с использованием ФТД, что на практике может приводить к ложному срабатыванию защиты и отключению неповрежденных присоединений.

Для повышения надежности ДгЗ целесообразно использовать ВОД, также имеющие оптический принцип действия. Их отличительная особенность заключается в том, что непосредственно в защищаемый отсек устанавливается собирающий пассивный элемент датчика, не подверженный электромагнитным воздействиям, сигнал от которого передается по волоконно-оптическому кабелю к фотоприемнику, вынесенному за пределы РУ.

Устройства ДгЗ, использующие для регистрации электрической дуги ВОД, имеют целый ряд преимуществ:

- высокое быстродействие;
- помехозащищенность;
- ВОД не требуют питания;
- диэлектрическая природа волоконно-оптического кабеля;
- невысокая стоимость.

По принципу фиксации свечения дуги различают два типа ВОД: точечные и линейные. Линейные датчики представляют собой кабель, способный захватывать излучение светового потока по участку своей длины, что позволяет использовать его в нескольких ячейках одновременно. В то же время такая особенность снижает точность определения места ДЗ. Точечные датчики улавливают свет своей торцевой поверхностью, угол захвата при этом может быть более 180° . Они обладают повышенной чувствительностью, что позволяет использовать минимум датчиков в ячейке, однако существует риск затенения.

Недостаток устройств ДгЗ, использующих ВОД – необходимость преобразования светового потока с выхода датчика в дискретный сигнал для дальнейшего анализа микропроцессорным терминалом ДгЗ. В качестве таких преобразователей используются либо регистраторы ДЗ, объединяющие сигналы с нескольких датчиков и преобразующие их в электрическую форму, либо специальные входные контакты дискретных плат терминала. Преобразование сигнала занимает около 15 мс, что отрицательно сказывается на быстродействии защиты. Вторым существенным недостатком ВОД является то, что соединительный волоконно-оптический кабель легко по-

вредить при монтаже, а именно – «сломать волокно» в результате его изгиба при прокладке в ячейках.

Несмотря на указанные недостатки, именно применение ВОД совместно с микропроцессорными терминалами ДгЗ позволяет обеспечить максимально эффективное выполнение требований к релейной защите (РЗ).

III. Варианты исполнения и требования к устройствам защиты от дуговых замыканий

Различают два варианта построения ДгЗ – распределенная и централизованная дуговая защита. Распределенная ДгЗ представляет собой совокупность отдельных устройств (блоков) ДгЗ, устанавливаемых в каждом защищаемом отсеке или ячейке РУ. Селективность такой защиты обеспечивается независимой работой отдельных блоков на отключение выключателя со стороны источника питания для защищаемого элемента. К одному блоку может быть подключено до 3-4 датчиков, расположенных в изолированных отсеках ячейки РУ. Пуск каждого из блоков распределенной ДгЗ происходит при появлении сигнала от датчика ДЗ защищаемого элемента и превышении амплитуды тока защищаемого присоединения значения уставки. По причине отсутствия в большинстве таких защит современных производителей собственных измерительных органов (уменьшение габаритных размеров и снижение стоимости защит), пуск по току реализуется по сигналу срабатывания пусковых органов максимальной токовой защиты (МТЗ) защищаемой ячейки. Пример построения распределенной ДгЗ с использованием ВОД представлен на рис. 1.

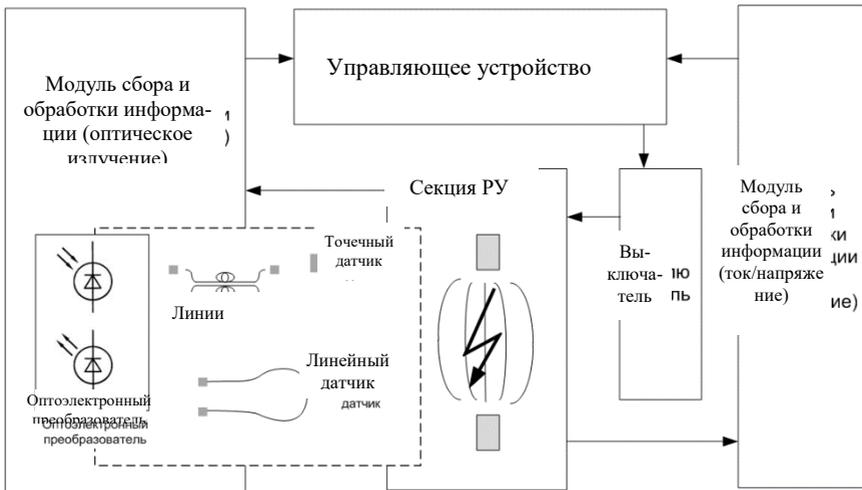


Рис. 1. Принципиальная схема блока распределенной ДгЗ

Централизованная ДгЗ состоит из одного микропроцессорного терминала РЗ, на дискретные входы которого приходит информация с датчиков ДЗ всех отсеков и ячеек защищаемой секции шин. Кроме того, в терминале имеется, как правило, отдельная плата аналоговых входов, к которой подведены сигналы с трансформаторов тока ввода и трансформатора напряжения защищаемой секции. Пример реализации централизованной ДгЗ секции шин напряжением 10 кВ представлен на рис. 2.

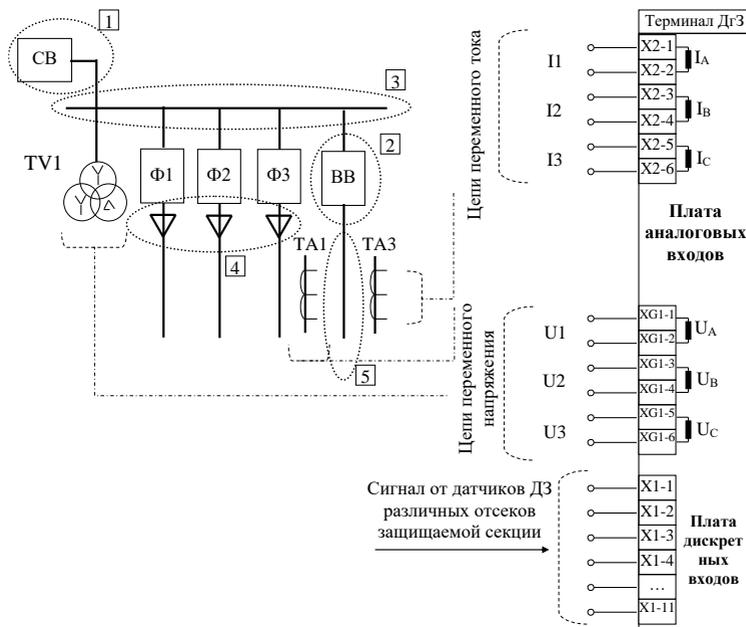


Рис. 2. Принципиальная схема централизованной ДгЗ:

зона секционного выключателя (1); зона вводного выключателя (2); зона сборных шин (3); кабельный отсек отходящих фидеров (4); зона ввода (5)

Для распределенного варианта выполнения ДгЗ отмечают следующие преимущества:

- 1) повышение надежности (при выходе из строя устройства или потере его питания нарушается работа ДгЗ только одной ячейки);
- 2) упрощение монтажа (нет потребности в монтаже вне пределов ячейки – не требуется установка шкафов ДгЗ, кабельных лотков и др.);

- 3) удобство обслуживания (при обслуживании или послеаварийном восстановлении, например, после ДЗ в кабельном отсеке, нет необходимости выводить из работы секцию РУ);
- 4) простота модернизации ДгЗ (при расширении РУ или задействовании резервных присоединений не требуется переконфигурация защиты всей секции, параметрирование вновь устанавливаемого терминала может быть выполнено путем копирования уставок аналогичной ячейки).

В то же время при правильном выполнении централизованного варианта ДгЗ ряд указанных преимуществ теряет актуальность. Так, значительно повысить надежность централизованного исполнения защиты можно путем установки двух взаиморезервирующих терминалов ДгЗ с одинаковым функциональным исполнением. Монтаж таких устройств на напряжение 6-35 кВ осуществляется в релейном отсеке РУ и, как правило, не требует установки отдельных шкафов защиты. Кроме того, современные микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), поддерживающие стандарт МЭК-61850, имеют возможность дистанционного изменения уставок и конфигурирования логических схем. Поэтому основным преимуществом распределенного исполнения ДгЗ остается упрощение монтажа и послеаварийного обслуживания устройства. В то же время распределенный вариант ДгЗ имеет ряд критических недостатков. Для их выявления рассмотрим действующие требования ОАО «Россети», установленные для микропроцессорных устройств РЗА [5]. Согласно этому документу, во всех цифровых терминалах ДгЗ должны быть реализованы следующие функции и характеристики:

- наличие контроля тока;
- запрет автоматического повторного включения (АПВ) выключателя ввода и автоматического включения резерва (АВР) секционного выключателя;

Количество входов для датчиков дуговой защиты – не менее трех: вспышка в отсеке шин, вспышка в отсеке выключателя или выкатной тележки и вспышка в кабельном отсеке.

Для реализации функции контроля тока требуется наличие в терминале ДгЗ аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Поэтому пуск дуговой защиты по сигналу от МТЗ, реализованный во всех существующих распределенных устройствах ДгЗ, не соответствует предъявляемым требованиям к микропроцессорным РЗА. Для устранения этого несоответствия потребуется либо оснащение каждого блока ДгЗ платой АЦП (существенно увеличивает стоимость каждого устройства), либо установка дополнительного блока защиты, осуществляющего контроль параметров режима защищаемой секции РУ (значительно возрастает стоимость за счет допол-

нительных соединительных кабелей и появления нового устройства). Поэтому, наиболее рациональным и экономически эффективным вариантом является организация централизованной микропроцессорной ДгЗ ячеек секции шин.

IV. Пример исполнения централизованной микропроцессорной дуговой защиты ячеек секции шин 6 (10) кВ

Для выбора универсального исполнения устройства ДгЗ ячеек секции шин необходимо рассмотреть варианты исполнения защищаемого РУ (рис. 3).

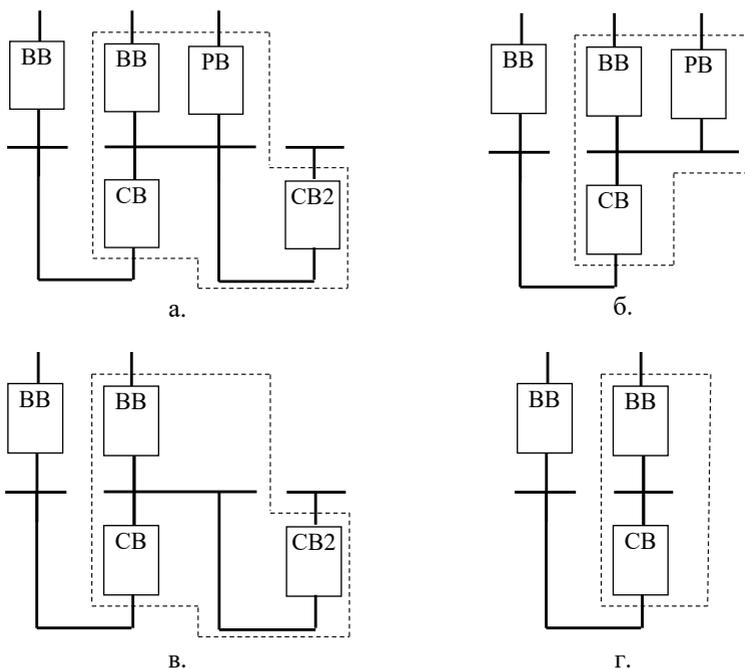


Рис. 3. Варианты исполнения защищаемого РУ:

- схема с резервным вводом и вторым секционным выключателем (а);
- схема без второго секционного выключателя (б);
- схема без резервного ввода (в);
- схема без резервного ввода и второго секционного выключателя (г)

Как видно из представленных на рис. 3 вариантов компоновки РУ, в наиболее общем случае в зоне защиты устройства ДгЗ предусматривается наличие ячеек основного и резервного ввода, двух секционных выключателей и ячеек отходящих присоединений. Поэтому для формирования сиг-

налов селективного отключения выключателей при ДЗ отсеки ячеек РУ целесообразно объединить в следующие зоны:

- зона кабельного отсека ячеек отходящих присоединений;
- зона сборных шин;
- зона ввода;
- зона выключателя ввода;
- зона секционного выключателя;
- зона ввода секционного выключателя;
- зона второго секционного выключателя;
- зона ввода второго секционного выключателя;
- зона выключателя резервного ввода;
- зона ввода выключателя резервного ввода.

В каждой ячейке устанавливается не менее трех ВОД, световые сигналы от которых обрабатываются и преобразуются в электрические в специальных устройствах, называемых регистраторами. Выделение зон защиты на основе отдельных ячеек или отсеков производится путем объединения выходов регистраторов от соответствующих датчиков по схеме монтажное «ИЛИ» и их последующем подключением на дискретные входы терминала ДгЗ, назначенные соответствующим сигналам.

Формирование логической команды возникновения ДЗ в определенной зоне защиты для исключения ложных срабатываний, вызванных неисправностью датчиков, происходит при одновременном наличии на входах терминала ДгЗ сигнала от регистратора и сигнала пуска защит. Поэтому общее количество дискретных входов терминала должно в два раза превышать число выделенных зон защиты от дуговых замыканий. Кроме того, необходимо предусмотреть контроль трех фазных токов вводного присоединения, а также контроль фазных или линейных напряжений защищаемой секции шин (необходимо для формирования сигналов пуска защит вводного и защит секционного выключателя). Для этого в терминале предусматривается по три аналоговых входа тока и напряжения, дополненные модулем АЦП.

При наличии в устройстве ДгЗ поддержки стандарта МЭК-61850, количество дискретных входов терминала может быть существенно сокращено за счет передачи сигналов срабатывания защит по интерфейсам коммуникаций. Функционально-логическая схема ДгЗ обеспечивает формирование выходных команд селективного отключения поврежденных ячеек, резервирование отказа выключателей, запрета АПВ или АВР и неисправности устройства, назначаемые на выходные реле терминала.

В. Выводы

Применение микропроцессорных устройств дуговой защиты позволяет обеспечить быстрое и селективное отключение поврежденных ячеек секции шин напряжением 6-35 кВ. Надежность и чувствительность дуговой защиты во многом определяется характеристиками датчиков, устанавливаемых в зоне защиты для фиксации появления электрической дуги. Различают распределенные и централизованные дуговые защиты. Последние являются более дешевыми и эффективными.

Рекомендуется применять централизованную микропроцессорную дуговую защиту с поддержкой стандарта МЭК-61850, выполненную с использованием волоконно-оптических датчиков.

© Вуколов В.Ю., 2019

© Петров А.А., 2019

© Горшкова Д.М., 2019

© Симонова Е.В., 2019

Библиографический список

- [1] Fiber optic sensor systems for arc flash detection, Avago Technologies, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.avagotech.com/docs/AV02-4503EN> (дата обращения 11.10.2019).
- [2] Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 2002. – 302 с.
- [3] Нагай В.И. Быстрдействующие дуговые защиты КРУ. Современное состояние и пути совершенствования // Новости электротехники. 2003. № 5 (23).
- [4] Гуревич В.И. Принцип построения дуговой защиты распределительных устройств 6-10 кВ // Энергетика и электрификация. 1992. № 3. С. 47-49.
- [5] Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Утв. и введ. в действ. приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 28.02.2017 № 82.

**V.Yu. Vukolov¹, A.A. Petrov²,
D.M. Gorshkova¹, E.V. Simonova¹**

PECULIARITIES OF IMPLEMENTATION OF MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION AGAINST ARC FAULT OF MODULE OF SECTION WITH VOLTAGE 0,4-35 kV

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

² Scientific and Research Company of General Machinery (NIPOM JSC),
Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract. The issues of increasing the reliability of power supply at a voltage of 0,4-35 kV by developing a high-speed and sensitive microprocessor arc protection are considered. The principle of operation of arc sensors is based either on the measurement of thermal or shock effects arising, or on the identification of one of the properties of optical radiation emitted by the flash of an electric arc. When determining the place of occurrence of an arc fault within the substation switchgear, it is advisable to use an arc protection with a fiber-optic sensor. There are distributed and centralized arc protection. The main advantage of distributed arc protection is a significant simplification of installation and after-service. But to implement the current control function requires the presence of an analog-to-digital converter in the terminal of arc protection, which significantly increases the cost of the device. Centralized arc protections are a cheaper and more cost-effective option.

Keywords: arc protection, microprocessor relay protection, reliability.

References

- [1] Fiber optic sensor systems for arc flash detection, Avago Technologies, 2014. [Online]. Available at: <http://docs.avagotech.com/docs/AV02-4503EN> [Accessed: Oct. 11, 2019].
- [2] V.I. Nagai, *Releynaya zashchita otvetitel'nykh podstantsiy elektricheskikh setey (Relay protection of branch substations of electric networks)*. Moscow: Energoatomizdat, 2002 (in Russian).
- [3] V.I. Nagai, «Bystrodeystvuyushchiye dugovyie zashchity KRU. Sovremennoye sostoyaniye i puti sovershenstvovaniya (High-speed arc protection of the switchgear. Current state and ways of improvement)», *Electric Engineering News*, vol. 5, no. 23, 2003 (in Russian).
- [4] V.I. Gurevich, «Printsip postroyeniya dugovoy zashchity raspredelitel'nykh ustroystv 6-10 kV (The principle of arc protection of switchgear 6-10 kV)», *Energetika i elektrifikatsiya*, vol. 3, pp. 47-49, 1992 (in Russian).
- [5] Tekhnicheskiye trebovaniya k mikroprotssessornym ustroystvam RZA (Technical requirements for microprocessor devices of relay protection and automation devices). STO 56947007-29.120.70.241-2017. Approved and enforced by the order of FGC UES PJSC dated 02.28.2017 No. 82 (in Russian).

УДК 621.311.1**А.Ю. Ефимов, А.О. Молоков, И.Н. Артемов****СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ПУТЕМ ПЕРЕХОДА
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6/10 кВ
НА НАПРЯЖЕНИЕ 20 кВ**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

Рассмотрены вопросы перехода на напряжение 20 кВ в распределительных электрических сетях России. Проанализированы его основные преимущества и факторы, влияющие на потери в электроэнергетических системах и сетях. Представлена принципиальная схема участка электрической сети. Приведен сравнительный расчет и анализ потерь напряжения, энергии, мощности в сетях 6/10/20 кВ, а также особенности расчета данных параметров. Приводятся основные выражения для расчета и полученные графические зависимости. Сделан вывод о целесообразности применения напряжения 20 кВ в распределительных электрических сетях.

Ключевые слова: линия электропередач, напряжение, потери напряжения, система электроснабжения, электросбережение.

I. Введение

Электросбережение – это реализация ряда правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное и рациональное использование электроэнергетических ресурсов. Повышенное внимание к проблеме электросбережения связано, в первую очередь, с увеличением потерь в электроэнергетических системах и сетях. Одним из возможных решений данной проблемы является модернизация транзитных и распределительных сетей.

II. Структура потерь в электрических сетях

Государство регулирует вопрос энергосбережения и энергетической эффективности на законодательном уровне путем принятия Федерального закона: «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 N 261-ФЗ [1].

Технические мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности электросетевого хозяйства должны быть направлены на снижение потерь электроэнергии, модернизацию системы

коммерческого и технического учета электроэнергии в распределительных и транзитных электрических сетях и у потребителей [2].

Структура потерь в электрических сетях представлена на рис. 1 [3].



Рис. 1. Структура технологических потерь электрической энергии

III. Экспертная оценка

Соотношение факторов, влияющих на потери в электроэнергетических системах и сетях относительно 100 %, было исследовано методом экспертной оценки. Экспертами выступили работники электроэнергетической сферы: оперативно-ремонтный персонал распределительных сетей, диспетчеры, инженеры, преподаватели кафедры Электрификации и автоматизации производства МГУ им. Н.П. Огарева (всего 10 чел.)

Результаты экспертизы представлены в табл. 1.

Экспертная оценка проводилась по следующим факторам:

- 1) влияние срока службы линий и оборудования на потери в электроэнергетических системах и сетях;
- 2) влияние аварийности в электроэнергетических системах и сетях на потери электроэнергии;

- 3) влияние класса напряжения линий электропередач на потери в электроэнергетических системах и сетях;
- 4) влияние нагрузочных потерь на потери электроэнергии в электроэнергетических системах и сетях;
- 5) влияние коммерческих потерь, а именно – несовершенства системы учета на потери электроэнергии в электроэнергетических системах и сетях.

Таблица 1.
Результаты проведенной экспертной оценки

Респонденты	Факторы, влияющие на потери в линиях электропередач				
	Срок службы	Аварийность линий	Напряжение в линиях	Нагрузочные потери	Несовершенство системы учета
1	60	10	10	10	10
2	15	15	15	15	40
3	30	20	20	20	10
4	10	40	30	15	5
5	30	10	40	10	10
6	20	20	20	20	20
7	20	10	30	20	20
8	40	35	10	10	5
9	10	40	30	10	10
10	15	15	20	25	25

Результаты экспертных оценок наглядно представлены на рис. 2. Данные позволяют сделать вывод, что потери, связанные с напряжением линий электропередач, занимают одну из лидирующих позиций: их численность составляет в среднем 25 %. Эти результаты позволяют с уверенностью сказать, что работа в направлении увеличения класса напряжения в электроэнергетических системах и сетях является актуальным и перспективным направлением в электросбережении.

Многочисленные исследования, проводимые российскими и зарубежными учеными, показывают: определяющее влияние на уменьшение потерь и улучшение качества передачи электроэнергии потребителю оказывает увеличение напряжения, что еще раз подтверждает результаты экспертной оценки.

IV. Сравнительный анализ потерь при напряжениях 6/10/20 кВ

Проведенный анализ существующих электрических сетей в Республике Мордовия показал высокий срок службы линий электропередач, что в некоторых случаях достигает 50-70 лет, причем без проведения существенных мероприятий по модернизации, что в свою очередь увеличивает потери в них [4]. Рост потерь также вызван увеличением потребления, обусловленного появлением большого числа промышленных объектов [5].

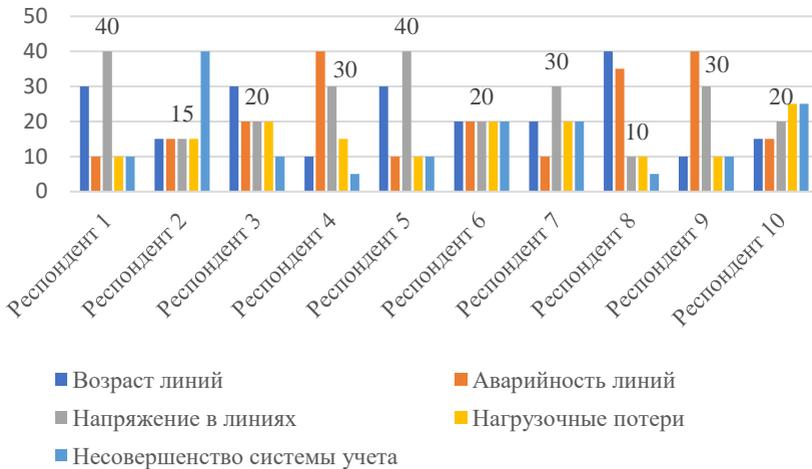


Рис. 2. Факторы, влияющие на потери электроэнергии (по результатам экспертной оценки)

Одним из способов снижения потерь электроэнергии в электрической сети является перевод распределительных сетей с напряжения 6/10 кВ на 20 кВ [3]. В России электрическую распределительную сеть напряжением 20 кВ внедрили в г. Москва для электроснабжения Ходынского поля, имеющего высотную застройку. Позже данный опыт был успешно применен при обеспечении электроснабжения комплекса «Москва-Сити» Это обусловлено большой плотностью электрических нагрузок на единицу площади и связано с необходимостью передачи в конкретный центр нагрузки большой электрической мощности. Также данный класс напряжения был введен в Ханты-Мансийском автономном округе, где плотности нагрузок невысокие, а удаленность потребителей от центров питания большая [6].

Основные преимущества перехода на напряжение 20 кВ:

- 1) снижение потерь мощности и электроэнергии;

- 2) увеличение пропускной способности линий, увеличение дальности обслуживания [7].

Рассмотрим схему сети, представленную на рис. 3. Трансформаторные подстанции (ТП) получают питание от главной понизительной подстанции. Для данной схемы выполнен расчет потерь напряжения и мощности на участке ВЛ 10 км с маркой провода АС 120/24 [8]. Мощность нагрузки данной линии 1 МВт. В качестве ГПП использована мобильная модульная подстанция ММПС 110/20(10) кВ, производства «ПитерЭнергоМаш». Типовое решение ММПС 110/20(10) кВ реализовано в виде двух самостоятельных модулей: модуля 110 кВ (модуль ВН) и модуля 20(10) кВ (модуль НН). Для ТП используется силовой трансформатор ТМГ 1000 кВА 20/0,4 кВ.

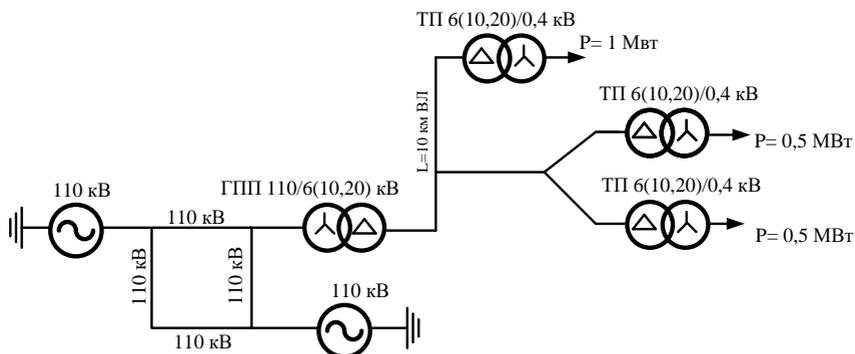


Рис. 3. Принципиальная схема электроснабжения 110/(6/10/20) кВ

Потери напряжения в линии:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление линии, Ом; X – индуктивное сопротивление линии, Ом.

$$\Delta U = \frac{100000 \cdot 19,8 + 31,76 \cdot 24,9}{6000} = 330,13 \text{ В.}$$

Потери напряжения для остальных нагрузок и напряжений рассчитаны аналогично, а результаты приведены в табл. 2.

Потери мощности на данном участке:

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{(P+Q)^2}{U^2 \cdot R_{\text{л}} \cdot 10^{-3}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{л}}$ – активное сопротивление линии, Ом; U – номинальное напряжение линии, В.

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{(100000 + 31,76)^2}{6000^2 \cdot 19,8 \cdot 10^{-3}} = 14038,1 \text{ Вт.}$$

Потери энергии на заданном участке линии:

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} \cdot \tau_{\text{л}}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{л}}$ – нагрузочные потери мощности в линии, соответствующие протеканию максимальной мощности, Вт; $\tau_{\text{л}}$ – время максимальных потерь, ч.

$$\tau = (0,124 + \frac{T_{\text{max}}}{10000})^2 \cdot 8760, \quad (4)$$

где T_{max} – количество часов использования максимальной нагрузки.

$$\tau = (0,124 + \frac{3500}{10000})^2 \cdot 8760 = 4152,24 \text{ ч,}$$

$$\Delta W_{\text{л}} = 14038,1 \cdot 4152,24 = 58289,533 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Остальные значения рассчитаны аналогично и отражены в табл. 2.

Таблица 2.

Потери мощности, энергии, напряжения

P , кВт	U , кВ	ΔU , В	ΔU , %	ΔP , Вт	ΔW , кВт·ч
100	6	330,13	5,5	14038,09	58289,53
	10	198,08	1,98	5053,71	20984,23
	20	99,04	0,5	1263,43	5246,058
200	6	660,13	11	56134,5	233084,1
	10	396,08	3,96	20208,44	83910,28
	20	198,04	0,99	5052,11	20977,57
300	6	990,13	16,5	126289,36	524383,74
	10	594,08	5,94	45464,17	188778,15
	20	297,04	1,49	11366,04	47194,54

На основе данных, приведенных в табл. 2, построены графики зависимостей потерь мощности, энергии и напряжения от напряжения линии электропередач распределительной сети, представленные на рис. 4-6 соответственно.

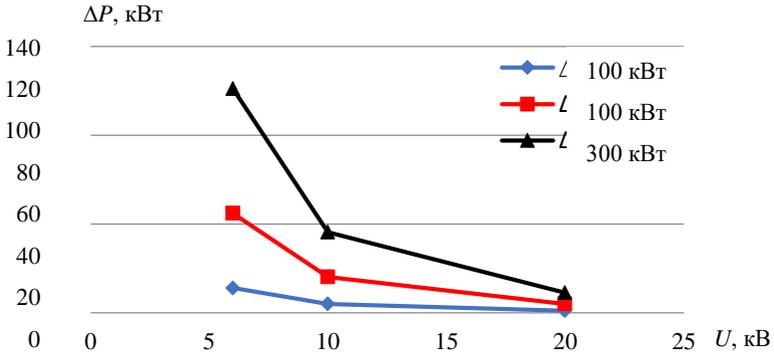


Рис. 4. График зависимости потерь активной мощности в линии от напряжения 6/10/20 кВ

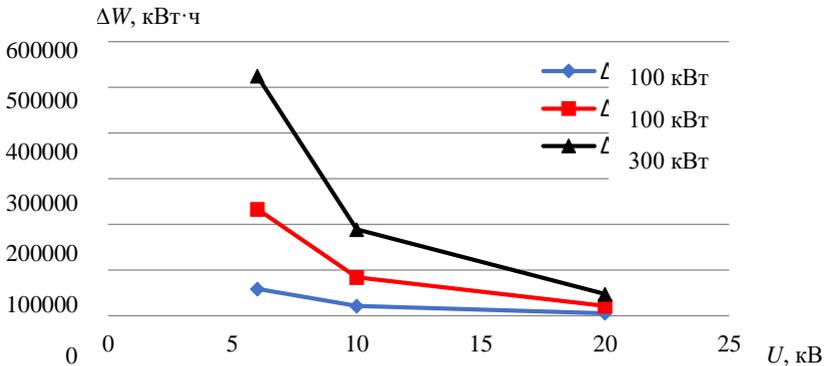


Рис. 5. Графики зависимости потерь энергии в линии от напряжения 6/10/20 кВ

V. Выводы

На основе построенных графиков можно судить об экономии электроэнергии при переходе с 6/10 кВ на 20 кВ в распределительных сетях. Следовательно, напряжение 20 кВ имеет следующие два преимущества по сравнению с 6/10 кВ.

1. Распределительные сети 20 кВ имеют большую пропускную мощность, что играет огромную роль в условиях увеличения потребления электроэнергии, как в промышленности, так и на производстве.

2. Класс напряжения 20 кВ в распределительных сетях дает возможность вдвое увеличить радиус обслуживания подстанций и существенно сократить число крупных узловых подстанций, учитывая, что при трансформации теряется от 5 до 7 % мощности и энергии, то это представляет собой огромные суммы средств и миллионы тонн потерянного топлива.

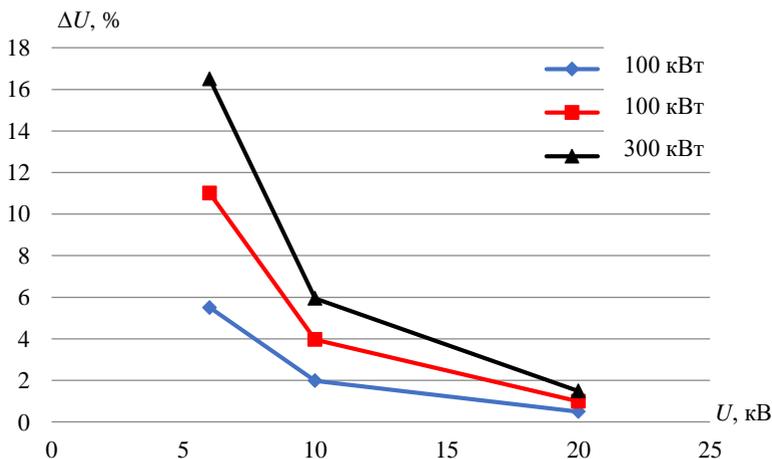


Рис. 6. График зависимости потерь напряжения в процентах в линии, от напряжения линии

Таким образом, использование напряжения 20 кВ в распределительных сетях целесообразно и актуально при проектировании новых сетей и подстанций, а также при реконструкции старых.

© Ефимов А.Ю., 2019

© Молоков А.О., 2019

© Артемов И.Н., 2019

Библиографический список

- [1] Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

- [2] ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7. Введ. 2003-01-01. М.: Госторгиздат, 2015. – 144 с.
- [3] Лыкин А.В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях. Новосибирск: НГТУ, 2013. – 115 с.
- [4] Ефимов А.Ю. Математическое моделирование сельских электрических сетей с целью повышения их безотказной работы: автореф. дис. канд. техн. наук, Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия, 2000. – 20 с.
- [5] Агеев В.А., Сурдейкин Д.А. Анализ нормальных электрических сетей 10 кВ рязанского РЭС // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы, Май 24-25, 2016, Саранск, Россия. Изд-во НИ МГУ им. Н.П. Огарева, 2016. С. 565-568.
- [6] Интервью руководства АО «ЮРЭСК» об особенностях строительства в Ханты-Мансийском Автономном Округе – ЮГРА линий электропередачи напряжением 20 кВ // Электроэнергия. Передача и Распределение. 2015. №2 (29). С. 6-13.
- [7] Ефимов А.Ю., Алехин А.О. Оценка надежности электроснабжения потребителей первой и второй категорий // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 2 (6). С. 74-84.
- [8] Идельчик В.И. Электрические сети и системы. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 351 с.

A.Yu. Efimov, A.O. Molokov, I.N. Artemov

LOSS REDUCTION IN DISTRIBUTION NETWORKS OF 6/10 kV BY TRANSITION TO 20 kV VOLTAGE

Ogarev Mordovia State University
Saransk, Russia

Abstract. The article considers the issues of transition to a voltage of 20 kV in distribution electric networks of Russia. The main advantages of switching to a voltage of 20 kV have been analyzed. An expert assessment has been carried out among employees of the electricity sector, and based on its results bar charts have been built. A schematic diagram of a section of an electrical network is presented. A comparative calculation and analysis of voltage, energy, and power losses in 6/10/20 kV networks are given, as well as features for calculating these parameters. The main expressions for the calculation and obtained graphic dependencies are given. It is concluded that it is advisable to use a voltage of 20 kV in distribution electric networks.

Keywords: power line, power saving, power supply system, voltage, voltage loss.

References

- [1] Federal Law No. 261-FZ dated November 23, 2009, «Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy ef-fektivnosti i o vnesenii izmeneniy v ot-del'nyye za-

- konodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii (On energy saving and on improving energy efficiency and on amending certain legislative acts of the Russian Federation))» (in Russian).
- [2] *Pravila ustroystva elektroustanovok. Izdanie 7 (Electrical Installation Rules. Volume 7)*. PUE 7, Jan. 2003. Moscow: Gostorgizdat, 2015 (in Russian).
- [3] A.V. Lykin, *Energoberezeniye i povysheniye energeticheskoy effektivnosti v elektricheskikh setyakh (Energy saving and increasing energy efficiency in electric networks)*. Novosibirsk: NGTU, 2013 (in Russian).
- [4] A.Yu. Efimov, «*Matematicheskoe modelirovanie sel'skih elektricheskikh setej s cel'yu povyshe-niya ih bezotkaznoj raboty (Mathematical modeling of rural electric networks for the purpose of increase in their no-failure operation)*», Cand. of Tech. S. thesis, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia, 2000, P. 20 (in Russian).
- [5] V.A. Ageev and D.A. Surdeikin, «*Analiz normal'nykh elektricheskikh setey 10 kV Ruzayevskogo RES (Analysis of normal electrical networks 10 kV Ruzaevsky RES)*», in proc. *Energoeffektivnyye i resursoberegayushchiye tekhnologii i sistemy (Energy-efficient and resource-saving technologies and systems)*, May 24-25, 2016, Saransk, Russia, pp. 565-568 (in Russian).
- [6] «*Interv'yu rukovodstva AO «YURESK» ob osobennostyah stroitel'stva v Hanty-Mansijskom Avtonomnom Okruge - YUGRA linij elektroperedachi napryazheniem 20 kV (Interview with the management of JSC «URESK» about the features of construction in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug - UGRA power lines with a voltage of 20 kV)*», *Electric power. Transmission and distribution*, vol. 2 (29), pp. 6-13, March-Apr. 2015 (in Russian).
- [7] A.Yu. Efimov and A.O. Alekhin, «*Assessment of reliability of power supply consumers of the first and second category*», *Intellektual'naya elektrotehnika*, vol. 2, no. 6, pp. 74-84, June 2019 (in Russian).
- [8] V.I. Idelchik, *Elektricheskiye seti i sistemy (Electric networks and systems)*. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).

УДК 621.31

Д.М. Кочеганов, А.В. Серебряков

СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Описана модель системы оценки качества функционирования преобразователя частоты с применением аппарата нечеткой логики. Имитационная модель системы построена при помощи пакета Matlab Simulink с расширением Fuzzy Logic Toolbox. Приведена структурная схема модели, перечень лингвистических правил, поверхности нечеткого вывода системы, функции принадлежности входных и выходных переменных. Полученная модель системы может быть использована в качестве функционального блока Matlab Simulink в моделировании работы энергетических установок, а также служить основой для разработки программного обеспечения систем поддержки принятия решений оператора электротехнического комплекса.

Ключевые слова: имитационное моделирование, качество функционирования, нечеткая логика, преобразователь частоты.

1. Введение

Преобразователи частоты (ПЧ) имеют широкое применение в производственной и электроэнергетической сферах. Одним из приложений данных устройств является использование в дизель-генераторных и ветряных энергетических установках. Преобразователи частоты дают возможность поддерживать параметры вырабатываемой установкой электрической энергии на требуемом уровне при изменяющемся потенциале ветрового потока или регулировании частоты вращения дизельного двигателя, что позволяет расширить рабочий диапазон ветроэнергетических установок и увеличить топливную эффективность дизель-генераторных установок [1].

Важными требованиями, предъявляемыми к современному энергетическому комплексу, являются малая численность обслуживающего персонала и низкие затраты на проведение планового технического обслуживания. Для выполнения этих требований создаются системы удаленной диагностики и мониторинга технического состояния оборудования. Тем не

менее, значительная доля доступных в продаже устройств не обладает требуемым функционалом, что влечет за собой необходимость разработки и совершенствования подобных систем.

Целью работы является разработка имитационной модели системы оценки качества функционирования преобразователя частоты в среде Matlab Simulink с применением аппарата нечеткой логики для поддержки принятия решений оператором о работоспособности оборудования и необходимости проведения техобслуживания.

II. Имитационная модель

Задачей системы является формирование оценки качества функционирования преобразователя частоты на основе технологических параметров, выбранных в качестве диагностируемых признаков и руководствуясь лингвистическими правилами, определенными экспертами в данной области [2]. Для решения данной задачи эффективным является использование аппарата нечеткой логики. Это обусловлено тем, что получить все необходимые входные данные для однозначной оценки надежности работы устройства и принятия решения о необходимости проведения технического обслуживания (изменения в структурах элементов устройства, возникновение изъянов материалов, стохастическая природа возникновения неисправностей) на текущем этапе развития техники не представляется возможным. Принятие решения, таким образом, производится в условиях несовершенства (неточности, неполноты, неоднозначности) исходных данных. Это обстоятельство делает применение методов классической логики затруднительным. Однако применение нечеткой логики позволяет дополнить классический подход набором правил, представляющим формализованный эмпирический опыт экспертов в данной области, что дает возможность автоматизации принятия верных управленческих решений даже при неполноте исходной информации.

На рис. 1 приведена структура разрабатываемой системы. Для ее построения используется пакет Matlab Simulink с расширением Fuzzy Logic Toolbox [3, 4].

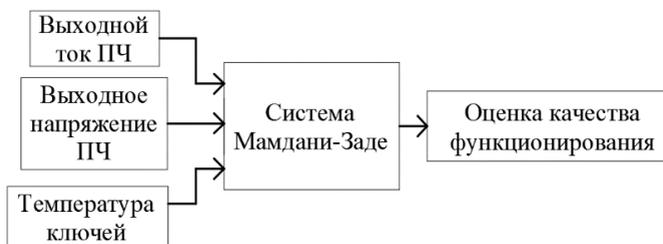


Рис. 1. Структурная схема системы

Входными переменными системы являются величины выходного тока, выходного напряжения и температуры силовых ключей преобразователя частоты. Выходная переменная системы – оценка качества функционирования преобразователя частоты – формируется системой нечеткого вывода по алгоритму Мамдани-Заде [5].

Для универсальности подхода пороговые значения физических величин выражаются в относительных единицах, где номинальному уровню параметра соответствует 1. Тип функций принадлежности и количество терминов для каждой лингвистической переменной были сформированы экспертным путем.

На рис. 2 представлены функции принадлежности переменной «Выходной ток ПЧ», величина которой характеризуется двумя терминами: «Нормальный» и «Высокий». Для переменной «Температура ключей» применено также два термина – «Нормальный» и «Высокий» (рис. 3). Для переменной Выходное напряжение ПЧ используется три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий» (рис. 4).



Рис. 2. Функции принадлежности лингвистической переменной «Выходной ток ПЧ»



Рис. 3. Функции принадлежности лингвистической переменной «Температура ключей»

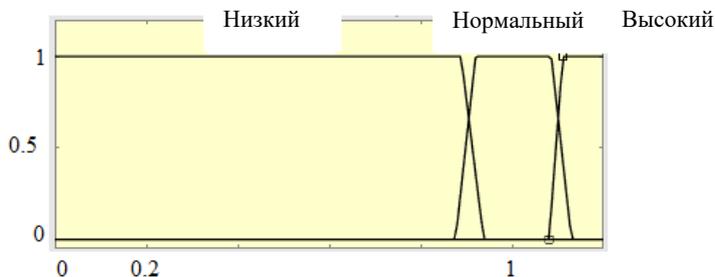


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистической переменной «Выходное напряжение ПЧ»

Функции принадлежности выходной переменной «Оценка качества функционирования» приведена на рис. 5. Для ее описания используется три термина: «Аварийный уровень», «Предупредительный уровень» и «Нормальный уровень».

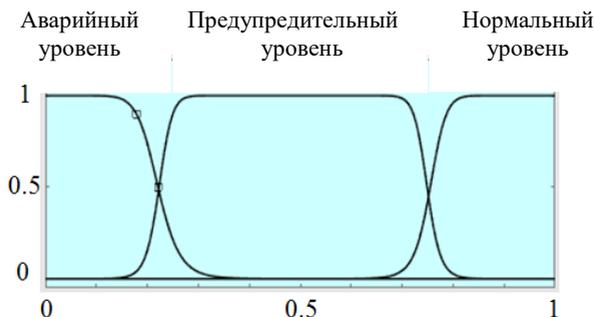


Рис. 5. Функции принадлежности лингвистической переменной «Оценка качества функционирования»

Экспертным путем был сформирован набор лингвистических правил, устанавливающих зависимость оценки качества функционирования преобразователя частоты от величин входных переменных (табл. 1).

II. Тестирование модели

На рис. 6 представлено отображение перечня лингвистических правил системы в средстве просмотра правил Rule Viewer. Данный инструмент позволяет протестировать работу системы, задавая произвольный набор входных переменных и оценивая величину выходной переменной.

Таблица 1.
Набор лингвистических правил

Номер	Правило
1	If (Temperature is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Condition is Normal) (1)
2	If (Temperature is High) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Condition is Warning) (1)
3	If (Temperature is High) and (Voltage is Normal) then (Condition is Warning) (1)
4	If (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Condition is Alarm) (1)
5	If (Temperature is Normal) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Condition is Alarm) (1)
6	If (Temperature is High) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Condition is Alarm) (1)
7	If (Current is Normal) and (Voltage is Low) then (Condition is Alarm) (1)
8	If (Temperature is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Low) then (Condition is Alarm) (1)
9	If (Temperature is High) and (Current is Normal) and (Voltage is Low) then (Condition is Alarm) (1)
10	If (Temperature is High) and (Current is Normal) and (Voltage is High) then (Condition is Alarm) (1)
11	If (Temperature is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is High) then (Condition is Alarm) (1)
12	If (Current is Normal) and (Voltage is High) then (Condition is Alarm) (1)

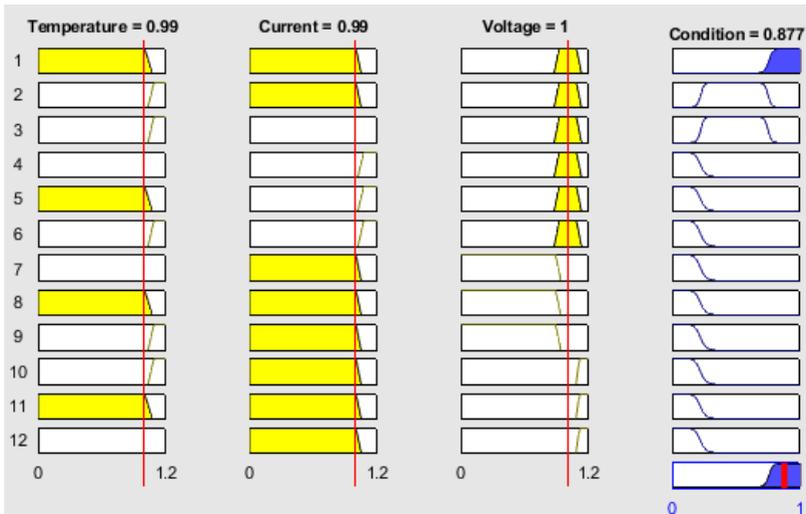


Рис. 6. Представление лингвистических правил в средстве *Rule Viewer*

Просмотр так называемых поверхностей нечеткого вывода системы позволяет визуально проверить полученные взаимосвязи входных и выходных переменных, рис. 7-9. Для построения поверхностей величины незадействованных переменных принимаются равными 1.

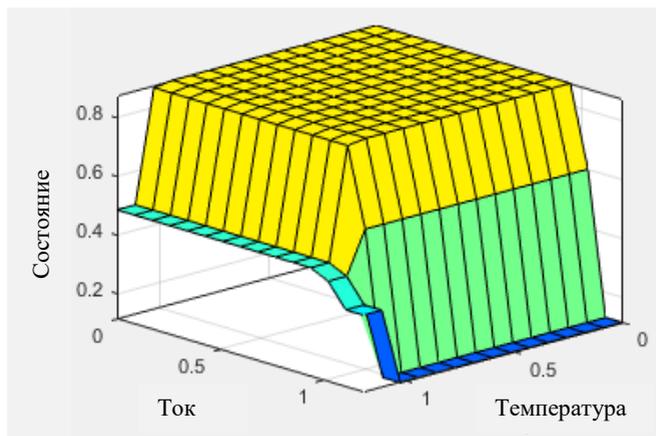


Рис. 7. Зависимость качества функционирования от величин тока и температуры

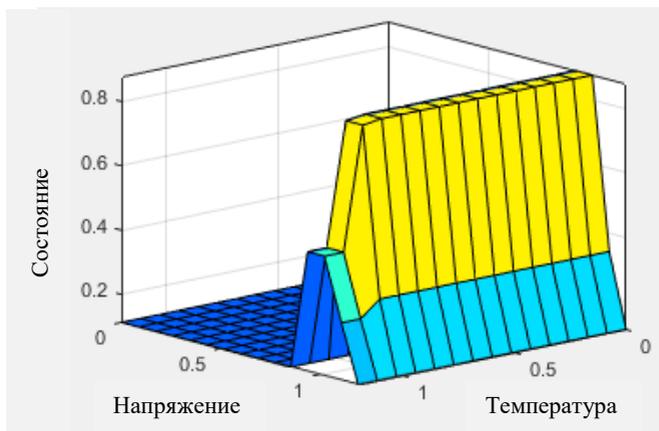


Рис. 8. Зависимость качества функционирования от величин напряжения и температуры

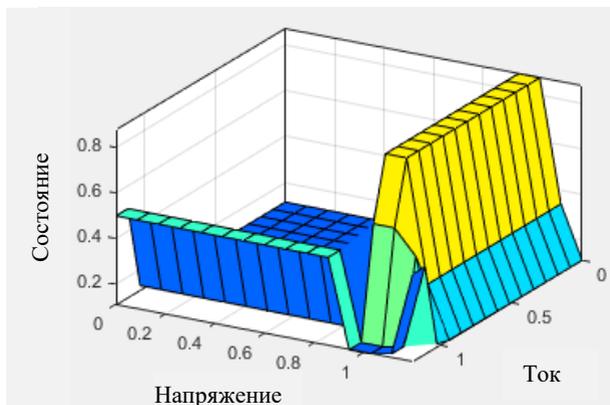


Рис. 9. Зависимость качества функционирования от величин напряжения и тока

IV. Заключение

Полученная система оценки качества функционирования преобразователя частоты позволяет оказать поддержку оператору при мониторинге технического состояния и анализе диагностических данных электротехнического комплекса. Использование аппарата нечеткой логики в области имеет своей целью повышение качества и уменьшение трудоемкости работы экспертов по оценке работоспособности устройства, позволяя при принятии решения использовать весь доступный объем информации, поступившей с датчиков технологических параметров, в дальнейшем давая также возможность применять средства статистической обработки данных и прогнозирования.

© Кочеганов Д.М., 2019

© Серебряков А.В., 2019

Библиографический список

- [1] Дарьенков А.Б., Бычков Е.В., Комраков Д.А., Абузяров Т.Х., Кочеганов Д.М. Физическая модель электротехнического комплекса гибридной электроустановки // III Всерос. (XXXVI Рег.) науч.-тех. конф. «Актуальные проблемы электроэнергетики», Декабрь 22, 2017, Нижний Новгород, Россия. Изд-во: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. С. 39-42.
- [2] Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Применение экспертных систем для обработки результатов диагностирования // Научный альманах. 2015. № 10-3 (12). С. 247-250.
- [3] Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide [Электронный ресурс]. URL: https://au.mathworks.com/help/releases/R2015b/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf (дата обращения 19.10.2019).

- [4] Fuzzy Logic Toolbox [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/> (дата обращения 21.10.2019).
- [5] What Is Mamdani-Type Fuzzy Inference? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-mamdani-type-fuzzy-inference.html/> (дата обращения 21.10.2019).

D.M. Kocheganov, A.V. Serebryakov

FUZZY LOGIC SYSTEM FOR ASSESSMENT OF FREQUENCY CONVERTER OPERATING QUALITY

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article describes a model of a system for assessing the quality of the functioning of a frequency converter using a fuzzy logic apparatus. The simulation model of the system is built in the Matlab Simulink with the Fuzzy Logic Toolbox extension. The structural diagram of the model, a list of linguistic rules, the surface of the fuzzy inference of the system, the membership function of the input and output variables are given. The resulting system model can be used as a functional block of Matlab Simulink in modeling the operation of power plants, as well as serve as the basis for the development of software for decision support systems for the operator of the electrical complex.

Keywords: frequency converter, fuzzy logic, simulation modeling, quality of operation.

References

- [1] A.B. Dar'enkov, E.V. Bychkov, D.A. Komrakov, T.Kh. Abuzyarov and D.M. Kocheganov, «Fizicheskaya model' elektrotekhnicheskogo kompleksa gibridnoy elektroustanovki (Physical model of the electrical complex of a hybrid electrical installation)», in proc. *III All-Russian Conf. Aktual'nyye problemy elektroenergetiki (Actual problems of the electric power industry)*, Dec. 22, 2017, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 39-42 (in Russian).
- [2] A.S. Steklov, V.G. Titov and A.V. Serebrjakov, «The use of expert systems for processing diagnostic results», *Science Almanac*, vol. 10-3, no. 12, pp. 247-250, Dec. 2015.
- [3] Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. [Online]. Available at: https://au.mathworks.com/help/releases/R2015b/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf [Accessed: Oct. 19, 2019].
- [4] Fuzzy Logic Toolbox. [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/> [Accessed: Oct. 21, 2019].
- [5] What is Mamdani-Type Fuzzy Inference? [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-mamdani-type-fuzzy-inference.html> [Accessed: Oct. 21, 2019].

УДК 621.311.26

О.А. Бурмакин, В.В. Гуляев, С.В. Попов, Г.А. Андреев**ПРИМЕНЕНИЕ MATLAB SIMULINK ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУДОВОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Волжский государственный университет водного транспорта

Развитие валогенераторных установок – одно из направлений повышения эффективности функционирования судовых электроэнергетических систем. Наиболее перспективной является валогенераторная установка на основе синхронного генератора и преобразователя частоты. При этом актуальной задачей является проведение исследований работы подобных установок в различных режимах. В статье представлены результаты разработки и исследования Simulink-модели валогенератора на основе синхронного генератора и преобразователя частоты. Получены диаграммы тока и напряжения на шинах валогенератора при различных значениях частоты вращения приводного двигателя. Установлено, что результаты моделирования в целом соответствуют переходным процессам в реальных установках. Разработанная модель может использоваться для проведения исследований судовых систем с валогенераторными установками.

Ключевые слова: валогенераторная установка, имитационное моделирование, преобразователь частоты, синхронный генератор, судовая система.

1. Введение

Применение валогенераторных установок (ВГУ) в составе судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) на судах морского и речного транспорта позволяет экономить топливо дизель-генераторных (ДГ) установок: снижение себестоимость электроэнергии достигает 30 % [1].

Требования Регистра запрещают длительную параллельную работу ВГУ и ДГ, а также предписывают переводить питание потребителей на основные источники электроэнергии при снижении хода судна. Это связано с изменением частоты напряжения вырабатываемой ВГУ электроэнергии и возникновением колебаний активной мощности, что негативно сказывается на работе СЭЭС и может привести к обесточиванию судна [2].

Развитие систем ВГУ направлено на расширение диапазона их работы, с целью обеспечения безопасности судоходства и повышения экономической эффективности [3]. Среди множества систем ВГУ с переменной частотой вращения наиболее перспективной, с точки зрения модернизации существующих установок, является ВГУ на основе синхронного

генератора (СГ) и преобразователя частоты (ПЧ). Создание адекватной виртуальной модели позволит исследовать работу ВГУ в различных режимах, что бывает затруднительно, а часто и невозможно на реальных установках [4].

II. Модель валогенератора

Для синтеза модели был выбран пакет Matlab Simulink [5]. Модель (рис. 1) представляет собой синхронный генератор, преобразователь частоты, выполненный на IGBT-транзисторах, и выходной LC-фильтр [6].

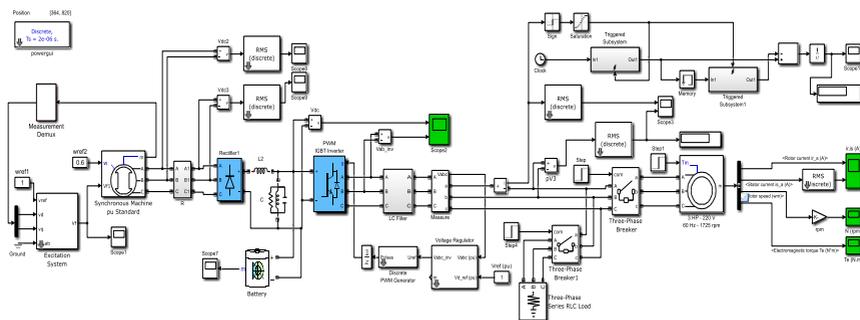


Рис. 1. Модель валогенератора СГ с ПЧ

Система управления ПЧ имеет обратную связь по напряжению, что позволяет поддерживать номинальное напряжение сети. Обратная связь осуществляется двумя блоками [7]: блок регулирования напряжения (voltage regulation) и генератор импульсов (Discrete PWM Generator). Блок регулирования напряжения построен на ПИ-регуляторе. В блоке генераторов импульсов задается несущая частота (carrier frequency) 10000 Гц. Частота тока на выходе преобразователя частоты равна 50 Гц. Модель позволяет задать частоту выходного напряжения без обратной связи при выборе значения internal generation of modulation signal (s) (внутренняя генерация сигнала модуляции). При этом можно выбрать частоту выходного напряжения в Герцах (frequency of output voltage), угол между фазами выходного напряжения в градусах (Phase of output voltage), индекс модуляции (modulation index), изменяющийся в диапазоне от 0 до 1, влияющий на выходное напряжение. Система управления ПЧ позволяет поддерживать частоту тока 50 Гц во всех режимах работы ВГУ. В качестве нагрузки использовались блоки RLC и асинхронный двигатель.

III. Результаты моделирования

Результаты моделирования исследуемой системы показаны на рис. 2-10.

При номинальной частоте вращения приводного двигателя напряжение на шинах валогенератора остается номинальным при подключении всех ступеней нагрузки (рис. 2). При снижении частоты вращения приводного двигателя до 0,9 от номинального значения, напряжение на шинах валогенератора падает на 20 В (рис. 3).

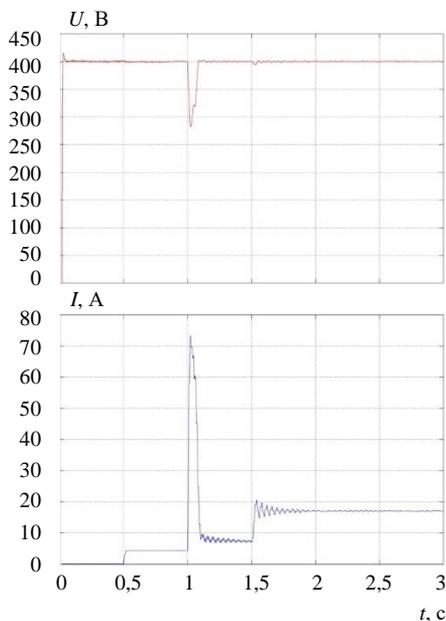


Рис. 2. Ток и напряжение на шинах валогенератора на выходе ПЧ при номинальной частоте вращения

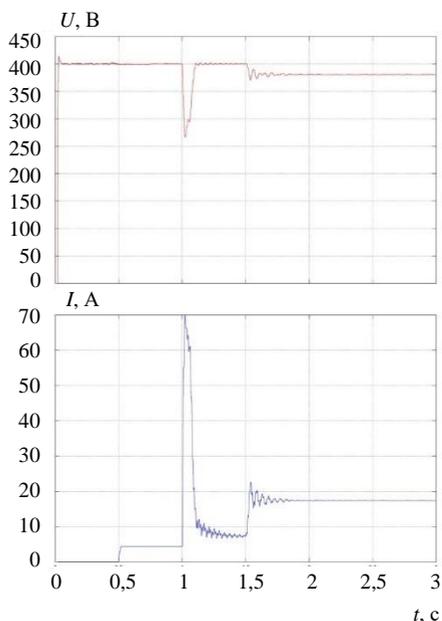


Рис. 3. Ток и напряжение на шинах валогенератора при $\omega = 0,9$

При дальнейшем снижении частоты вращения приводного двигателя до 0,6 от номинальной частоты вращения уровень напряжения на холостом ходу сохраняется на номинальном уровне (рис. 4), но при подключении активной нагрузки в момент времени 0,5 с напряжение падет до 368 В. Далее, при подключении асинхронного двигателя на холостом ходу, в момент времени 1 с напряжение остаётся на уровне 368 В. При подключении нагрузки к асинхронному двигателю напряжение падает до 328 В. Поэтому для улучшения характеристик в динамических режимах в звено постоянного тока ПЧ включена аккумуляторная батарея (АБ). Результаты моделирования с АБ приведены на рис. 5 и 6.

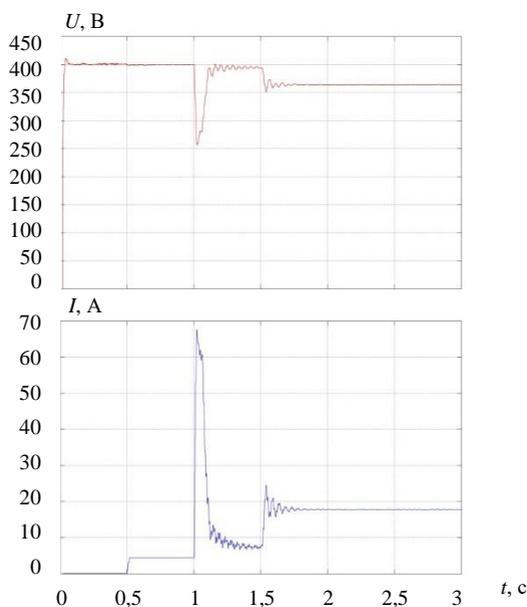


Рис. 4. Ток и напряжение на шинах валогенератора на выходе ПЧ при $\omega = 0,6$

При частоте вращения приводного двигателя равной $\omega = 0,9$ (о.е.) напряжение на выходе ПЧ сохраняется на номинальном уровне (400 В). При этом: при подключении нагрузки в момент времени 0,5 с (активная нагрузка), 1 с (асинхронный двигатель на холостом ходу) и 1,5 с (асинхронный двигатель под номинальным моментом нагрузки), напряжение восстанавливается за короткий промежуток времени, равный 0,1 с (рис. 5).

При частоте вращения приводного двигателя, равной $\omega = 0,6$ (о.е.), значение напряжения не изменяется, как в статическом, так и в динамическом режиме. Благодаря АБ, при подключении нагрузки в звене постоянного тока сохраняется номинальное напряжение, при динамическом режиме работы ВГУ (рис. 6).

Ниже показаны результаты моделирования при одновременном изменении характера нагрузки и частоты вращения приводного двигателя.

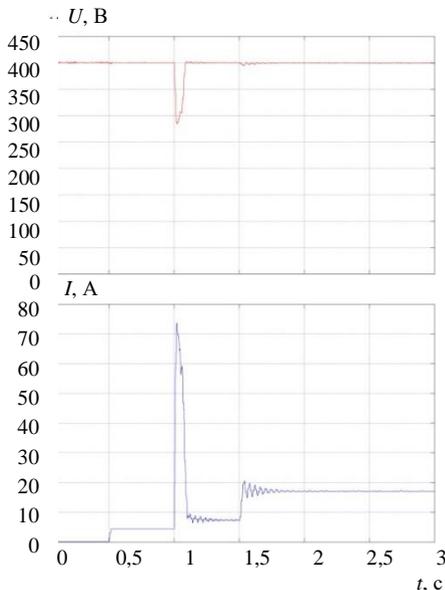


Рис. 5. Напряжение и ток на выходе ПЧ при $\omega = 0,9$

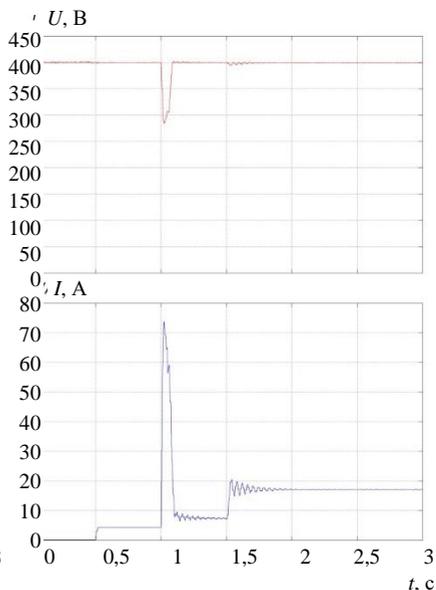


Рис. 6. Напряжение и ток на выходе ПЧ при $\omega = 0,6$

Из них видно, что система не реагирует на изменение характера нагрузки в диапазоне $\cos\varphi = 0,3 \div 1$ (рис. 7). Напряжение сохраняется на номинальном уровне. Однако при снижении частоты вращения приводного двигателя до 0,6, напряжение под нагрузкой падает до определенного уровня, в зависимости от $\cos\varphi$ нагрузки. Если $\cos\varphi = 1$, напряжение при подключении нагрузки падает до 375 В (рис. 8). При значениях $\cos\varphi = 0,3 \div 0,6$ и подключении нагрузки напряжение снижается до 370 В (рис. 9, 10).

Разработанная модель в целом отражает качество происходящих в СЭЭС с ВГУ реальных переходных процессов при изменении частоты вращения приводного двигателя, мощности и характера нагрузки.

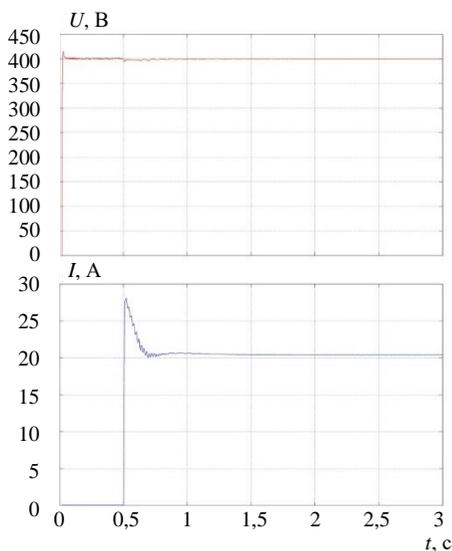


Рис. 7. Напряжение и ток на выходе ПЧ при $\omega = 1$; $\cos\varphi = 0,3 \div 1$

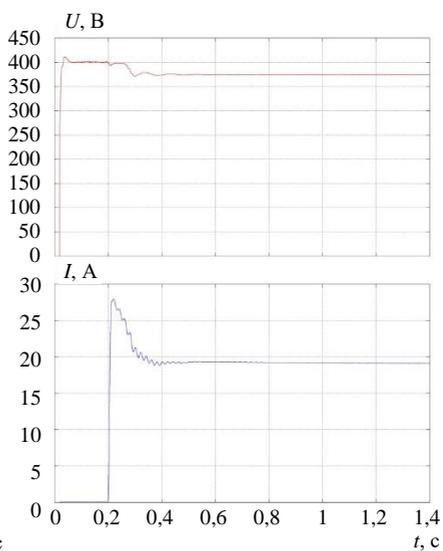


Рис. 8. Напряжение и ток на выходе ПЧ при $\omega = 0,6$; $\cos\varphi = 1$

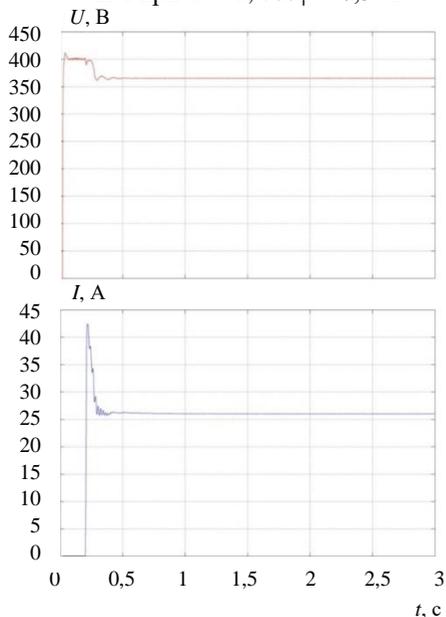


Рис. 9. Напряжение и ток на выходе ПЧ при $\omega = 0,6$; $\cos\varphi = 0,6$

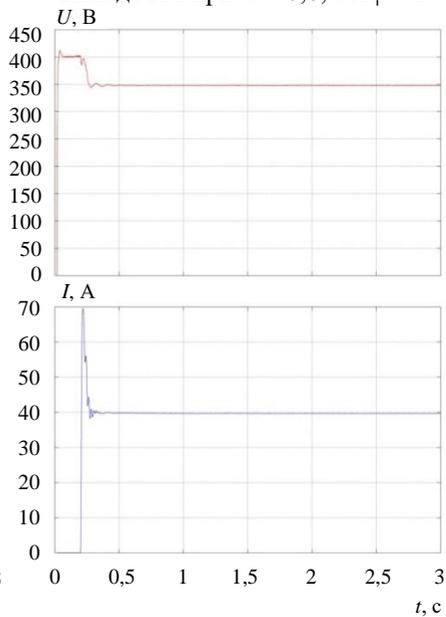


Рис. 10. Напряжение и ток на выходе ПЧ при $\omega = 0,6$; $\cos\varphi = 0,3$

© Бурмакин О.А., 2019

© Гуляев В.В., 2019

© Попов С.В., 2019

© Андреев Г.А., 2019

Библиографический список

- [1] Григорьев А.В., Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки. С.-Пб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. – 176 с.
- [2] Коробко Г.И., Шилов М.П., Бурмакин О.А., Включение дизель-генератора с изменяемой частотой вращения на параллельную работу с сетью // Тр. межд. науч.-промыш. форума. Мат. науч.-метод. конф. «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек», Май 16-19, 2017, Н. Новгород, Россия. С. 136.
- [3] Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р. Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами // Вестник Государственного Университета Морского и Речного Флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2015. № 3(31). С. 164-171.
- [4] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Попов С.В., Шилов М.П. Оценка адекватности модели СЭЭС в переходных режимах работы // Тр. межд. науч.-промыш. форума. Мат. науч.-метод. конф. «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек», Май 16-19, 2017, Н. Новгород, Россия. С. 132.
- [5] Бурмакин О.А., Гуляев В.В., Попов С.В. Разработка модели судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) в среде Matlab // Мат. VII Межд. науч.-практ. конф. «Флотское образование и отраслевая наука. Вызовы и перспективы развития», Декабрь 11-12, 2018, Астрахань, Россия. С. 307-311.
- [6] Бурмакин О.А., Шилов М.П., Малышев Ю.С., Попов С.В., Имитационная модель судовой электростанции // Вестник ВГАВТ. 2016. № 48. С. 273-280.
- [7] Бурмакин О.А., Попов С.В., Малышев Ю.С., Алексеев А.В. Моделирование ВГУ с ПЧ в программной среде Matlab // Тр. межд. науч.-пром. форума. Мат. науч.-метод. конф. «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек», Май 15-18, 2018, Н. Новгород, Россия. С. 138.

O.A. Burmakin, V.V. Gulyaev, S.V. Popov, G.A. Andreev

**MATLAB SIMULINK APPLICATION FOR ANALYSIS
OF SHIP ELECTRICAL POWER SYSTEM
OPERATION MODES**

Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. One of the directions of increasing the functioning efficiency of ship electric power systems is associated with the development of a shaft-generating plants. The most promising is the shaft generator unit based on a synchronous generator and a frequency converter. The urgent task is to study the operation of such installations in various operating modes. The paper presents the results of the development and research of a Simulink model of the shaft generator based on the synchronous generator and the frequency converter. The current and voltage diagrams on the buses of the shaft generator are obtained for various values of the rotation frequency of the drive motor. It was found that the simulation results, in general, correspond to transients in real installations. The developed model can be used to conduct research on ship systems with shaft-generating installations.

Keywords: frequency converter, shaft generator plant, ship system, simulation, synchronous generator.

References

- [1] A.V. Grigoryev and V.A. Petukhov, *Sovremennyye i perspektivnyye sudovyye valogeneratorskiye ustanovki (Modern and promising ship shaft generator sets)*. St. Petersburg: GMA n.a. S.O. Makarov, 2009 (in Russian).
- [2] G.I. Korobko, M.P. Shilov and O.A. Burmakin, «Switching – on of diesel generator with changed frequency rotation for parallel operation with the mains», in proc. *Int. scien. and ind. forum «Great Rivers». Mat. of the scien.-method. conf. «Problems of use and innovative development of inland waterways in the basins of the great river»*, May 16-19, 2017, Nizhny Novgorod, Russia, P. 136.
- [3] A.V. Grigorev and R.R. Zajnullin, «Analysis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators», *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, vol.3 (31), pp. 164-171, 2015.
- [4] O.A. Burmakin, Y.S. Malyshev, S.V. Popov and M.P. Shilov, «Evaluation of the adequacy of the model of ship electric power system in transitional modes of work», in proc. *Int. scien. and ind. forum «Great Rivers». Mat. of the scien.-method. conf. «Problems of use and innovative development of inland waterways in the basins of the great river»*, May 16-19, 2017, Nizhny Novgorod, Russia, P. 132.
- [5] O.A. Burmakin, V.V. Gulyaev and S.V. Popov, «Razrabotka modeli sudovoy elektroenergeticheskoy sistemy (SEES) v srede Matlab (Development of model of a ship electric power system in Matlab)», in proc. *VII Int. scien. and pract. conf.*

- «*Flotskoe obrazovanie i otraslevaya nauka. Vyzovy i perspektivy razvitiya (Naval education and industry science. Challenges and development prospects)*», Dec. 11-12, 2018, Astrakhan, Russia, pp. 307-311 (in Russian).
- [6] O.A. Burmakin, M.P. Shilov, Y.S. Malyshev and S.V. Popov, «*A ship power plant simulation mode*», Bulletin of VSAWT, vol. 48, pp. 273-280, 2016.
- [7] O.A. Burmakin, S.V. Popov, Y.S. Malyshev and A.V. Alekseev, «*Modeling of the shaft-generator installation with the drive in the software Matlab*», in proc. *Int. sci-en. and ind. forum «Great Rivers». Mat. of the scien.-method. conf. «Problems of use and innovative development of inland waterways in the basins of the great rivers*», May 15-18, 2018, Nizhny Novgorod, Russia, P. 138.

УДК 621.31

Е.В. Жилин¹, М.В. Абдулваххаб²

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ИРАКА

¹ Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

² Дияла университет, Ирак

Описаны основные проблемы электроснабжения районов Республики Ирак. Выявлено, что наиболее эффективными мероприятиями для электроснабжения удаленных районов является использование распределенной генерации в виде фото-дизельных электростанций с автоматической системой регулирования напряжения. Указаны основные преимущества и недостатки, влияющие на режим работы электрической системы при использовании фото-дизельных электростанций. Для фрагмента электрической системы Ирака 11 кВ предложена методика и выполнен расчет нормального режима работы. Рассчитана мощность, генерируемая фото-дизельными электростанциями, определены потоки мощности в ветвях сети. Анализ режима показал, что предлагаемая методика расчета позволяет оптимизировать режим работы распределительной сети Ирака 11 кВ за счет выбора наиболее оптимальной мощности фото-дизельных электроустановок. Сделан вывод, что комплексное управление нормальными и послеаварийными режимами работы обеспечивает повышение эффективности работы распределительных сетей Ирака с распределенной генерацией.

Ключевые слова: нормальный режим работы, поток мощности, распределенная генерация, распределенная сеть Ирака, фото-дизельные электростанции.

1. Введение

Множество районов Республики Ирак не имеют доступа к центральному электроснабжению, а кроме того, вся электроэнергетическая система значительно устарела и перегружена. Для питания децентрализованных систем электроснабжения и снижения загрузки элементов электроэнергетических систем используется распределенная генерация в виде дизель-генераторов различной мощности [1-3]. Однако доставка топлива в удаленные места может привести к нестабильной работе таких установок. Высокий уровень солнечного излучения в Ираке позволяет использовать гибридные фото-дизельные электроэнергетические системы с фотоэлек-

трическими панелями и современными автоматизированными дизельными электростанциями [4, 5].

Используемые фото-дизельные электростанции имеют автоматические системы регулирования уровня напряжения в точке подключения. Такие установки положительно влияют на режимы работы распределительных сетей Ирака 11 кВ [6-8] и обеспечивают:

- изменение величины и направления потоков мощности;
- снижение потерь мощности и электроэнергии;
- повышение уровня напряжения в узлах нагрузок;
- обеспечение автономной работы на длительный срок при авариях.

Однако использование распределенной генерации создает проблемы при управлении режимами работы. Поэтому необходимо учитывать распределенную генерацию при расчете режимов работы распределительных сетей Ирака 11 кВ. Классические подходы расчета не позволяют учитывать в узлах фото-дизельные установки, способные регулировать напряжение.

Для расчета режимов разомкнутых распределительных сетей Ирака с распределенной генерацией в виде фото-дизельных электростанций, требуются подходы, применяемые при расчетах замкнутых электрических сетей с двухсторонним питанием, но при этом необходимо учитывать особенности топологии разомкнутых сетей. Однако в распределительных сетях фото-дизельные электростанции установлены более чем в двух узлах, что говорит о необходимости анализа расчета режимов распределительных сетей Ирака 11 кВ [9-11].

II. Расчетная схема

На рис. 1 представлен участок схемы распределительной сети Ирака 11 кВ. Схема состоит из 14 узлов и 13 ветвей, один из узлов является источников питания 11 кВ. К узлам 21, 22, 32, 34, 35, 41, 42, 5 подключены электрические нагрузки. В узлах 5, 35 установлены фото-дизельные электростанции.

Параметры схемы замещения и электрические нагрузки узлов представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Параметры схемы замещения и электрические нагрузки узлов

Параметры узлов			Параметры ветвей		
№ узла	P_p , кВт	Q_p , квар	№ ветви	Z , Ом	B , См·10 ⁻⁶
1	–	–	1 – 2	2,85+j5,68	-j79,8
2	–	–	2 – 21	3,26+j6,49	-j91,2
21	14	7	2 – 22	3,67+j7,31	-j102,6
22	7	3	2 – 3	2,24+j4,46	-j62,7
3	–	–	3 – 31	2,04+j4,06	-j57

Продолжение табл. 1.

31	–	–	31 – 32	$2,68+j4,55$	$-j29,9$
32	6	4	31 – 33	$2,92+j4,96$	$-j32,6$
33	–	–	33 – 34	$3,41+j5,79$	$-j38,1$
34	15	7	33 – 35	$1,95+j3,31$	$-j21,7$
35	5	3	3 – 4	$3,17+j5,38$	$-j35,3$
4	–	–	4 – 41	$2,68+j4,55$	$-j29,9$
41	15	6	4 – 42	$2,44+j4,14$	$-j27,2$
42	6	3	4 – 5	$2,19+j3,72$	$-j24,5$
5	7	4	–	–	–

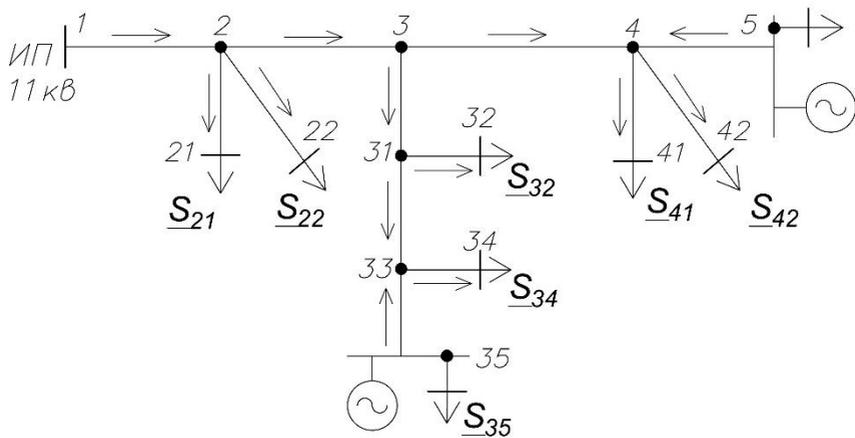


Рис. 1. Участок распределительной сети Ирака 11 кВ

При отключении фото-дизельной электростанции в узле 35 потоки мощности без учета потерь на участке 1-2 определяется по выражению [12, 13]:

$$\underline{S}_{12} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_5}{\underline{Z}_{1-5}} \cdot \underline{U}_H + \frac{\sum_{i=2}^4 \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{i-5}}{\underline{Z}_{1-5}}, \quad (1)$$

где \underline{U}_1 – напряжение в узле 1 (источник питания 11 кВ); \underline{U}_5 – напряжение в узле 5 (фото-дизельная электростанция); \underline{U}_H – номинальное напряжение распределительной сети; \underline{Z}_{1-5} – суммарное сопротивление участка между узлами 1 и 5; \underline{Z}_{i-5} – суммарное сопротивление участков между узлами i и 5:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{2-5} = \underline{Z}_{2-3} + \underline{Z}_{3-4} + \underline{Z}_{4-5}; \\ \underline{Z}_{3-5} = \underline{Z}_{3-4} + \underline{Z}_{4-5}; \\ \underline{Z}_{4-5} = \underline{Z}_{4-5}. \end{cases} \quad (2)$$

При включении фото-дизельной электростанции в узле 35 распределительная электрическая сеть превращается в сеть с трехсторонним питанием. Для определения генерирующей мощности фото-дизельной электростанции необходимо составить уравнения второго закона Кирхгофа с учетом потоков уравнивающих мощностей для каждой ветви, соединяющей источник питания 11 кВ с генерирующим узлом.

III. Результаты расчета режима работы

Для рассматриваемого фрагмента схемы распределительной сети Ирака требуется составить два уравнения. За положительное направление обхода выбрано направление от источника питания к генерирующим узлам.

$$\begin{cases} \underline{S}_{1-2} \cdot \underline{Z}_{1-2} + \underline{S}_{2-3} \cdot \underline{Z}_{2-3} + \underline{S}_{3-31} \cdot \underline{Z}_{3-31} + \underline{S}_{31-33} \cdot \underline{Z}_{31-33} - \underline{S}_{33-35} \cdot \underline{Z}_{33-35} + \\ + \frac{U_1 - U_{35}}{Z_{1-35}} \cdot U_H = 0; \\ \underline{S}_{1-2} \cdot \underline{Z}_{1-2} + \underline{S}_{2-3} \cdot \underline{Z}_{2-3} + \underline{S}_{3-4} \cdot \underline{Z}_{3-4} - \underline{S}_{4-5} \cdot \underline{Z}_{4-5} + \frac{U_1 - U_5}{Z_{1-5}} \cdot U_H = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Потоки мощности в ветвях представлены через мощности нагрузок и неизвестные мощности, генерируемые фото-дизельными электростанциями в распределительную сеть:

$$\begin{cases} \underline{S}_{33-35} = \underline{S}_{35} - \underline{S}_{\Gamma 35}; \\ \underline{S}_{31-33} = \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} - \underline{S}_{\Gamma 35}; \\ \underline{S}_{3-31} = \underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} - \underline{S}_{\Gamma 35}; \\ \underline{S}_{4-5} = \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5}; \\ \underline{S}_{3-4} = \underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5}; \\ \underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5} - \underline{S}_{\Gamma 35}; \\ \underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{21} + \underline{S}_{22} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5} - \underline{S}_{\Gamma 35}. \end{cases} \quad (4)$$

После подстановки полученных потоков мощности в систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (\underline{S}_{21} + \underline{S}_{22} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5} - \underline{S}_{\Gamma 35}) \cdot \underline{Z}_{1-2} + \\
 + (\underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5} - \underline{S}_{\Gamma 35}) \cdot \underline{Z}_{2-3} + \\
 + (\underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} - \underline{S}_{\Gamma 35}) \cdot \underline{Z}_{3-31} + (\underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} - \underline{S}_{\Gamma 35}) \cdot \underline{Z}_{31-33} - \\
 - (\underline{S}_{35} - \underline{S}_{\Gamma 35}) \cdot \underline{Z}_{33-35} + \frac{U_1 - U_{35}}{Z_{1-35}} \cdot U_H = 0; \\
 (\underline{S}_{21} + \underline{S}_{22} + \underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5} - \underline{S}_{\Gamma 35}) \cdot \underline{Z}_{1-2} + \\
 + (\underline{S}_{32} + \underline{S}_{34} + \underline{S}_{35} + \underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5} - \underline{S}_{\Gamma 35}) \cdot \underline{Z}_{2-3} + \\
 + (\underline{S}_{41} + \underline{S}_{42} + \underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5}) \cdot \underline{Z}_{3-4} - (\underline{S}_5 - \underline{S}_{\Gamma 5}) \cdot \underline{Z}_{4-5} + \frac{U_1 - U_5}{Z_{1-5}} \cdot U_H = 0.
 \end{array} \right. \quad (5)$$

Результатом решения системы уравнений являются неизвестные мощности, генерируемые фото-дизельными электростанциями:

$$\underline{S}_{\Gamma 5} = 46,25 + j20,9 \text{ МВА}; \quad \underline{S}_{\Gamma 35} = 24,53 + j13,4 \text{ МВА}. \quad (6)$$

Учитывая потоки мощности от источников распределенной генерации, выполняется расчет потокораспределения в остальных ветвях. Результаты расчета представлены на рис. 2.

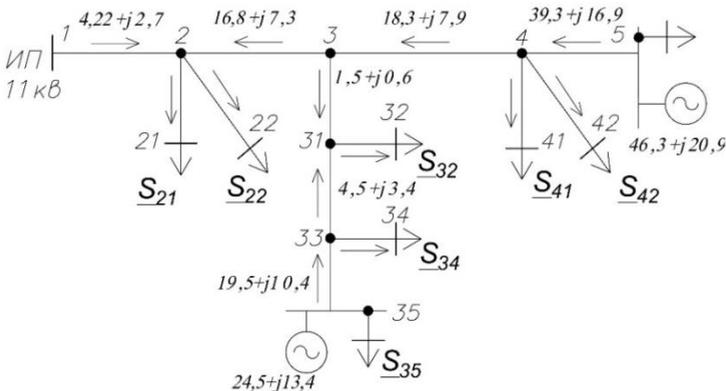


Рис. 2. Потокораспределение в распределительной сети Ирака

IV. Заключение

Представлен способ расчета режимов работы распределительных сетей Ирака 11 кВ с учетом распределенной генерации, работающей параллельно с энергосистемой. Полученный результат обеспечит повышение эффективности работы распределительных сетей, даст возможность комплексно управлять нормальными и послеаварийными режимами распределительной сети, включающей распределенную генерацию.

Представленный подход расчета позволит оптимизировать режим работы распределительной сети Ирака 11 кВ за счет выбора наиболее оптимальных мощностей фото-дизельных электроустановок.

© Жилин Е.В., 2019

© Абдулваххаб М.В., 2019

Библиографический список

- [1] Авербух М.А., Абдулваххаб М.В., Жилин Е.В., Сизганова Е.Ю. Особенности режимов распределительных электроэнергетических сетей Ирака // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2019. № 12 (5). С. 607-616.
- [2] Fishov A., Shiller M., Dekhterev A., Fishov V. Stability monitoring and control of generation based on the synchronized measurements in nodes of its connection // Journal of Power and Energy Engineering. 2015. № 9 (1). P. 59-67.
- [3] Mesquita F.G.G. Design optimization of stand-alone hybrid energy systems: MEEC thesis, FEUP, Portugal, Porto, 2010. – 120 p.
- [4] Costa P.M., Matos M.A. Loss allocation in distribution networks with embedded generation // IEEE transactions on power systems. 2004. № 19 (1). P. 384-389.
- [5] Воропай Н.И., Бат-Ундрал Б. Методы обеспечения эффективности и надежности систем электроснабжения с распределенной генерацией // Межд. науч. сем. «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». 2009. № 59. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009.
- [6] Булатов Б.Г., Тарасенко В.В. Алгоритмы интеллектуального управления режимом распределительной сети // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. № 37. С. 18-22.
- [7] Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Энергоэффективность фотоэлектростанций в автономных системах электроснабжения. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 140 с.
- [8] Mamaghani A.H., Escandon S.A.A., Najafi B., Shirazi A., Rinaldi F. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia // Renewable Energy. 2016. № 97 (C). P. 293-305.
- [9] Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. Электрические системы. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1998. – 511 с.
- [10] Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 287 с.

- [11] Винников Б.Г., Зеленский Д.А., Картавец В.В. Расчет режимов разомкнутых распределительных сетей методом распределения мощности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 8. С. 171-174.
- [12] Бат-Ундрал Б., Воропай Н.И., Расчеты режимов радиальной электрической сети интервальным методом // Электричество. 2008. № 10. С. 64-66.
- [13] Фурсанов М.И., Золотой А.А., Макаревич В.В. Учет потребительских энергоисточников в расчетах распределительных электрических сетей 6-10 кВ // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011. № 4. С. 11-16.

E.V. Zhilin¹, M.W. Abdulwahhab²

FEATURES OF INFLUENCE OF DISTRIBUTED GENERATION ON POWER FLOW DISTRIBUTION OF ELECTRIC NETWORK OF IRAQ

^{1,2} Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov
Belgorod, Russia

² University of Diyala
Diyala Governorate, Iraq

Abstract. The object of the study is the section of the 11 kV distribution network in Iraq. The main problems of power supply in the Republic of Iraq regions are described. As this study shows the most effective measures for the electrical supply of remote areas is the use of distributed generation in the form of photo-diesel power plants with an automatic voltage regulation system. It was also noted the main advantages and disadvantages affecting of the operating mode of the distribution network when using photo-diesel power plants. A brief description of the section of the 11 kV distribution network of Iraq is given, its main parameters are presented. The basic input data for calculating the normal mode of operation taking into account the use of distributed generation operating in parallel with the power system are indicated, and a method for calculating the normal mode of operation is proposed. The calculation of the operating mode for the section of the 11 kV distribution network of Iraq is completed. The generated power from a photo-diesel power plants has been calculated and the power flows in the branches of the 11 kV distribution network have been determined. The analysis of the regime showed that the proposed calculation method allows optimizing the operation mode of the 11 kV distribution network of Iraq by choosing the most optimal power of photo-diesel electrical installations. This will provide an increase in the efficiency of distribution networks, and will make it possible to comprehensively manage the normal and post-emergency modes of the Iraq distribution network, including distributed generation.

Keywords: distributed generation, Iraq's distributed networks, normal operation, photo-diesel power plants, power flow.

References

- [1] M.A. Averbukh, M.W. Abdulwahhab, E.V. Zhilin and E.Yu. Sizganova, «The Special features of the iraqi distribution electric power networks», *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, vol. 12, no. 5, pp. 607-616, May 2019.
- [2] A. Fishov, M. Shiller, A. Dekhterev and V. Fishov, «Stability monitoring and control of generation based on the synchronized measurements in nodes of its connection», *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 9 (1), pp. 59-67, Jan. 2015.
- [3] F.G.G. Mesquita, *Design optimization of stand-alone hybrid energy systems*”, MEEC thesis, FEUP, Portugal, Porto. 2010.
- [4] P.M. Costa and M.A. Matos, «Loss allocation in distribution networks with embedded generation», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 384-389, Feb. 2004.
- [5] N.I. Voropai and B. Bat-Undral, «Metody obespecheniya effektivnosti i nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya s raspredelennoj generaciej (Methods for ensuring the efficiency and reliability of distributed generation power systems)», in proc. *Rudenko Int. conf. «Methodological problems in reliability study of large energy system*», vol. 59, 2009. Irkutsk: ISEM SB RAS, 2009 (in Russian).
- [6] B.G. Bulatov and V.V. Tarasenko, «Algorithms of intelligent control of distributing network modes», *Bulletin of South Ural State University, Series «Power Engineering»*, vol. 37, pp. 18-22, Sept. 2012.
- [7] B.V. Lukutin and E.B. Shandarova, *Energoeffektivnost' fotoelektrostantsiy v avtonomnykh sistemakh elektrosnabzheniya (Energy efficiency of photovoltaic power plants in autonomous power supply systems)*. Tomsk: Izd-vo TPU (TPU Publishing House), 2008 (in Russian).
- [8] A.H. Mamaghani, S.A.A. Escandon, B. Najafi, A. Shirazi and F. Rinaldi, «Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia», *Renewable Energy*, vol. 97 (C), pp. 293-305, 2016.
- [9] V.A. Venikov, A.A. Glazunov and L.A. Zhukov, *Elektricheskiye sistemy. Elektricheskkiye seti (Electrical systems. Electric networks)*. Moscow: Vysshaya shkola (Higher School), 1998 (in Russian).
- [10] V.I. Idelchik, *Raschety i optimizatsiya rezhimov elektricheskikh setey i sistem. Energoatomizdat (Calculations and optimization of modes of electric networks and systems)*. Moscow: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).
- [11] B.G. Vinnikov, D.A. Zelensky and V.V. Kartavtsev, «Calculation of rates of the distributive networks the method of distribution of capacity», *Bulletin of Voronezh State Technical University*, vol. 5, no. 8, pp. 171-174, 2009.
- [12] B. Bat-Undral and N.I. Voropai, «Raschety rezhimov radial'noy elektricheskoy seti interval'nym metodom (Calculation of the modes of the radial electric network by the interval method)», *Elektrichestvo*, vol. 10, pp. 64-66, 2008 (in Russian).
- [13] M.I. Fursanov, A.A. Zalatoi and V.V. Makarevich, «Account of consumer power sources in calculations of distributive electrical networks of 6-10 kV», *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, vol. 4, pp. 11-16, 2011.

УДК 621.314

Е.В. Калинин, А.И. Чивенков

**РЕЗКИЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ В СТЫКАХ
ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена зависимость динамических процессов от действия нормальной составляющей магнитного потока Φ_n в зоне перекрытия стыков шихтованных сердечников силовых трансформаторов. Показано, что формирование потерь на вихревые токи $R_{вп}$ от потоков Φ_n в стыках происходит при резком поверхностном эффекте, когда значения коэффициента динамики $\xi > 4$. По результатам физического моделирования потерь $R_{вп}$ в стыках прямоугольной проводящей пластины определены отличительные особенности резкого поверхностного эффекта в стыках. Поток Φ_n действует в двух узких зонах перекрытия стыков по краям стальных пластин и имеет равномерное распределение по ширине b . Удельные потери $R_{уд.вп}$ зависят от взаимного направления потоков Φ_n по краям пластины: согласного – для ступенчатых стыков типа «step-lap» или встречного – для стыков внахлест типа «butt-lap». Потери $R_{уд.вп}$ в стыках сохраняют характер зависимости от амплитуды магнитного потока $\Phi_{нм}$, частоты f , удельной электропроводности γ , но изменяют зависимость от ширины пластин b и от магнитной проницаемости в перпендикулярном направлении к плоскости пластин электротехнических сталей μ_{\perp} . С использованием намагничивающего устройства на частоте $f = 50$ Гц в условиях поверхностного эффекта от потока Φ_n проведены исследования распределения магнитной индукции по ширине прямоугольных образцов (32x100) мм трансформаторных сталей марок Э350, 3404, 3409. Определены реальные величины относительной магнитной проницаемости кремнистых сталей μ'_{\perp} , значения которых не превышают $\mu'_{\perp} < 200$. Установлено, что μ'_{\perp} для различных электротехнических сталей отличается незначительно, не чувствительна к отжигу и другим внешним воздействиям, слабо зависит от магнитной индукции основного тангенциального потока шихтованного сердечника.

Ключевые слова: вихревые токи, коэффициент динамики, магнитная проницаемость, нормальная составляющая магнитного потока, потери в стыках, резкий поверхностный эффект, силовые трансформаторы, физическая модель, шихтованный сердечник, электротехническая сталь.

1. Введение

Обсуждение проблемы потерь в стыках зачастую выявляет упрощенное понимание особенностей формирования этих потерь в различных конструкциях шихтованных магнитных систем (МС) [1-5].

Инженерные методики расчета потерь холостого хода силовых трансформаторов [1] и многочисленные предлагаемые новые решения конструкций стыков шихтованных МС [6] в течение длительного периода времени основывались на представлении, что основная часть дополнительных потерь связана с уплотнением основного магнитного потока Φ_t в зоне стыков. При этом предполагалось, что потери находятся в зависимости от размера перекрытия стыков t [1-4].

В результате экспериментов по разделению потерь в стыках установлено, что при частоте промышленной сети $f = 50$ Гц значительную долю прироста удельных потерь $\Delta P_{уд}$ составляют удельные потери на вихревые токи $P_{уд.вп}$ от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n при переходе потока в соседние слои шихтовки, которые могут в разы превышать прирост удельных потерь на гистерезис и вихревые токи $\Delta P_{уд.гв}$ от тангенциального потока Φ_t [7-9].

Теоретически показано [8, 9], что с применением в шихтованных МС перспективных трансформаторных сталей с меньшими удельными потерями доля потерь на вихревые токи $P_{уд.вп}$ еще более возрастает. Этому имеются и экспериментальные подтверждения [4, 5].

В работе [4] проведен анализ замены стыков внахлест типа «butter» в МС силовых трансформаторах на прогрессивные ступенчатые стыки типа «step-lap» и сделан вывод об отсутствии ожидаемого снижения потерь холостого хода в связи с увеличением в стыках потерь $P_{уд.вп}$. В работе [5] выполнено экспериментальное сравнение потерь в трехфазных МС со стыками внахлест одинаковых размеров и исполнения, изготовленных из (ходовой) холоднокатаной стали и стали марки Hi-B с той же толщиной листов (0,3 мм), но с удельными потерями на 20 % ниже. Однако отношение удельных потерь в МС к удельным потерям в материале для ходовой стали оказалось на (10-12) % ниже, чем для стали Hi-B.

В обоих рассмотренных случаях [4, 5] имеют место потери $P_{уд.вп}$, связанные с динамическими процессами в стыках, которые не зависят от магнитных свойств электротехнической стали в плоскости прокатки. Эти процессы протекают в условиях резкого поверхностного эффекта (РПЭ) переменного электромагнитного поля в проводящей среде и зависят от ширины пластин сердечника b , а не от перекрытия t [8-13].

II. Постановка задачи

В работе [12] для одномерной пространственной задачи проводящей пластины (когда один из поперечных размеров много меньше другого – $b \ll L$) с постоянной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$ и удельной электропроводностью γ получено аналитическое решение проникновения синусоидального электромагнитного поля с частотой f . Выводится формула удельных потерь на вихревые токи $P_{\text{уд.в}}$ с введением обобщенного параметра – коэффициента динамики ξ , являющегося отношением ширины пластины к глубине проникновения электромагнитного поля a :

$$\xi = b / a, \quad (1)$$

где a – расстояние от поверхности пластины, на котором электромагнитное поле затухает в $\sqrt{2}$ раз [12].

Значение коэффициента динамики ξ определяется выражением:

$$\xi = b \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}. \quad (2)$$

При амплитуде средней по сечению магнитной индукции B_m формула потерь $P_{\text{уд.в}}$ в [12] имеет вид:

$$P_{\text{уд.в}} = \pi^2 / (6\sigma) \cdot B_m^2 \cdot \gamma \cdot b^2 \cdot f^2 \cdot F(\xi), \quad (3)$$

где:

$$F(\xi) = 3 / \xi \cdot (\text{sh}\xi - \sin\xi) / (\text{ch}\xi - \cos\xi). \quad (4)$$

Точка $\xi = 4$ является нижней границей РПЭ [12].

При значениях $\xi \geq 4$ $F(\xi) \approx 3 / \xi$, и формула (3) принимает вид:

$$P_{\text{уд.в}} = \pi^{1.5} / (2\sigma) \cdot B_m^2 \cdot b \cdot f^{1.5} \cdot \sqrt{\gamma / \mu}, \quad (5)$$

где σ – плотность материала пластины.

Последние исследования [8-11, 13] свидетельствуют о наличии РПЭ в стыках шихтованных сердечников силовых трансформаторов. На условия распространения вихревых токов в пластинах и удельные потери $P_{\text{уд.вл}}$ от потоков Φ_n в стыках оказывают влияние те же величины и в той же степени, что и в формуле (5). Изменяется только характер зависимости от линейного размера: $P_{\text{уд.вл}} \equiv \sqrt{b}$, а на процессы динамики оказывает влияние

магнитная проницаемость в перпендикулярном направлении к плоскости прокатки листовой стали μ_{\perp} .

В работе [14] проведены экспериментальные исследования магнитной проницаемости и потерь $P_{вн}$ при действии нормального магнитного потока Φ_n U – образного намагничивающего устройства (НУ) при $f = 50$ Гц на пакеты из 80 прямоугольных пластин электротехнической стали (Япония) размерами (50x100) мм и (25x100) мм. Получены эмпирические формулы: для потерь $P_{вн}$ в пластинах, близкая к формуле (5); для магнитной проницаемости μ_{AC} :

$$\mu_{AC} = L / S \cdot \sqrt{\mu / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \gamma)}, \quad (6)$$

где L и S – длина и площадь сечения пластины; $\mu = \mu' \cdot \mu_0$ – магнитная проницаемость материала (стали) в направлении действия магнитного потока Φ_n . Таким образом, в выражении (6) проницаемость материала $\mu = \mu_{\perp\text{мат}} = \mu'_{\perp\text{мат}} \cdot \mu_0$ и считается известной; μ_{AC} = $\mu_{пл}$ является динамической проницаемостью прямоугольной пластины при действии переменного потока Φ_n и характеризует пластину как устройство. Потребность в μ_{AC} появляется при решении статических задач проникновения внешнего магнитного поля через поверхность плоскостной ферромагнитной среды [14].

При изучении процессов формирования потерь на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока в стыках шихтованных сердечников необходимой оказывается величина $\mu_{\perp\text{мат}}$ [10]. Возникает потребность исследовать связь потерь на вихревые токи $P_{вн}$ в стыках с параметрами, влияющими на развитие РПЭ. При этом важно знать $\mu_{\perp\text{мат}}$ используемых холоднокатаных сталей. Для определения $\mu_{\perp\text{мат}}$ можно воспользоваться результатами исследований [14].

III. Результаты исследования поверхностного эффекта в стыках, полученные на физической модели

Экспериментальные исследования удельных потерь $P_{уд,вн}$ от потоков Φ_n в стыках шихтованных сердечников [6,7] и на физических моделях потерь в стыках №1 и №2 [10,13] подтвердили наличие резкого поверхностного эффекта. При этом РПЭ от потоков Φ_n в стыках имеет ряд принципиальных отличий [10,11,13] (рис. 1) от классического случая проникновения плоской электромагнитной волны в проводящую пластину [12,14]:

- магнитные потоки Φ_n действуют только в зонах перекрытия, расположенных на противоположных краях пластины;
- вихревые токи распространяются за пределами зон перекрытия по всему периметру пластины [13];

- магнитный поток Φ_n в зоне перекрытия равномерно распределен по ширине пластины b , продолжая равномерно распределенный по сечению тангенциальный поток Φ_τ при переходе в соседние слои шихтовки. Отличие потоков Φ_τ и Φ_n связано только с наличием также равномерного потока воздушного зазора стыка Φ_δ (рис. 1).

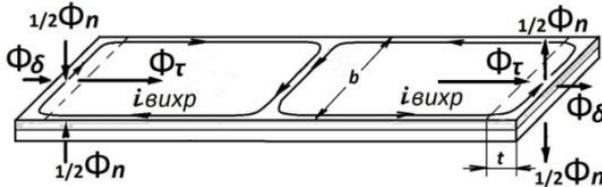


Рис. 1. Магнитные потоки Φ_τ , Φ_n и Φ_δ в зоне стыков для одной шихтовочной позиции пластин (для стыков внахлест)

В прямоугольной пластине с магнитным потоком Φ_n , равномерно распределенным вдоль большого размера L , при слабой нелинейности магнитных свойств ($\mu \approx \text{const}$) зависимость относительного значения потерь на вихревые токи P^* от отношения линейных размеров пластины L/b и различных значениях коэффициента динамики ξ находится в достаточно узком интервале между двумя крайними кривыми: для $\xi < 2$ и для $\xi \gg 4$ (рис. 2, а).

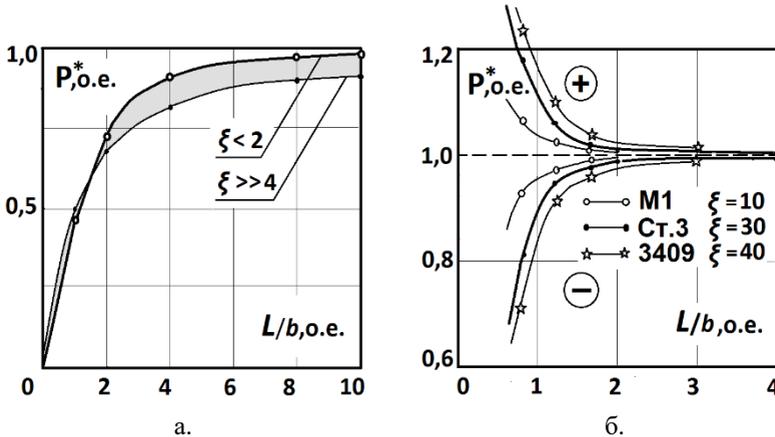


Рис. 2. Зависимости относительного значения потерь на вихревые токи от отношения линейных размеров $P^*(L/b)$ в пластине (а) и в стыках при согласных (+) и встречных (-) потоках Φ_n (б)

При этом $P^* = P_{уд.вн2} / P_{уд.вн1}$, где $P_{уд.вн2}$ – удельные потери в пластине при двухмерной постановке задачи расчета электромагнитного поля (при реальных значениях L и b), а $P_{уд.вн1}$ – при одномерной задаче (когда $L \gg b$) [10].

При действии потоков Φ_n в двух крайних зонах пластины зависимости $P^*(L/b)$ представлены сложными семействами кривых: для встречных (-) и согласных (+) потоков (рис. 2, б). При встречных потоках (-) – эффект взаимной компенсации потерь P^* [13] возрастает с ростом ξ и уменьшается с ростом (L/b) . При согласных потоках (+) для потерь P^* наблюдается асимптотическое уменьшение с ростом (L/b) , размах которого также возрастает с ростом ξ .

На рис. 2, б для сравнения представлены зависимости $P^*(L/b)$ пластин шириной $b = 100$ мм из меди М1 ($\xi = 10$) и сталей Ст.3 ($\xi = 30$), 3409 ($\xi = 40$). Наибольшее изменение кривых $P^*(L/b)$ наблюдается при $L/b < 2$, а минимальное – при $L/b > 4$.

Следует учитывать, что в проводящих пластинах из разных материалов и одинаковых: геометрических размерах, частоте f и потоке Φ_n при более высоких значениях коэффициента динамики ξ могут быть меньшие удельные потери $P_{уд.вн}$. Например: пластина 1 – медь М1 $\gamma_1 = 5,7 \cdot 10^7$ См/м; $\mu'_{\perp 1} = 1$; пластина 2 – сталь 3404 $\gamma_2 = 2 \cdot 10^6$ См/м; $\mu'_{\perp 2} = 110$.

Используем формулу (2):

$$\xi_2 / \xi_1 = \sqrt{\gamma_2 / \gamma_1 \cdot \mu'_{\perp 2} / \mu'_{\perp 1}} \approx 2,$$

и формулу для потерь (5):

$$P_{уд.вн2} / P_{уд.вн1} = \sqrt{\gamma_2 / \gamma_1 \cdot \mu'_{\perp 1} / \mu'_{\perp 2}} = 1/56.$$

Таким образом коэффициент динамики ξ у пластины из стали 3404 в 2 раза больше, а удельные потери $P_{уд.вн}$ в 56 раз меньше, чем у пластины из меди М1.

IV. Определение магнитной проницаемости μ_d электротехнической стали по экспериментальным данным

В работе [14] получены зависимости распределения по ширине пластин b относительного значения амплитуды магнитной индукции $B^* = B / B_m$ и удельных потерь $P_{уд}$ от потока Φ_n в разных слоях – m пакетов пластин с использованием специальных локальных измерительных обмоток.

На рис. 3, а представлены кривые $P_{уд(m)}$. На рис. 3, б – кривые $B^*(x)$ при различных m для пакета (50x100) мм с наибольшим динамическим эффектом от действия потока Φ_n . Потери по слоям определялись по дина-

мическим петлям гистерезиса $B(H)$. Полные потери измерялись ваттметровым методом. Потери $P_{уд(m)}$ – из условия баланса мощностей по слоям пакета. На рис. 3, в изображены зависимости $B(H)$ пакета (50x100) мм на поверхности, при $m = 1$ и внутри пакета, при $m \geq 10$.

Характер кривых на рис. 3 свидетельствует:

- в наружном слое пакета ($m = 1$) магнитный поток Φ_n распределен равномерно;
- потери $P_{уд}$ имеют свои наибольшие значения;
- при переходе потока Φ_n во внутренние слои происходит нарастающее вытеснение индукции B^* к краям пластин под действием вихревых токов;
- при $m \geq 10$ вытеснение индукции стабилизируется в соответствии с условиями [12] для РПЭ в пластинах; это подтверждают зависимости $P_{уд(m)}$ на рис. 3, а и характеристики $B(H)$ на рис. 3, в.

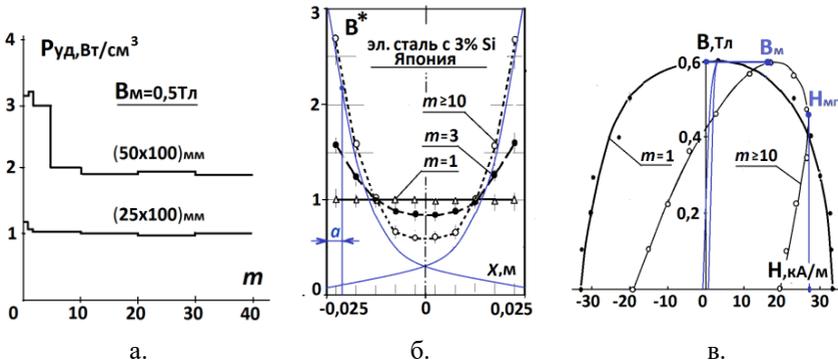


Рис. 3. Кривые $P_{уд}(m)$ для двух пакетов пластин (а); зависимости $B^*(x)$ (б) и динамические петли гистерезиса $B(H)$ (в) на поверхности ($m = 1$) и внутренних слоях ($m = 3; 10$) пакета пластин (50x100) мм [14]

Расчет $\mu_{\perp\text{маг}}$ производим через определение коэффициентов динамики ξ при допущении $\mu = \text{const}$ двумя способами: по кривой $B^*(x)$ и по магнитной характеристике $B(H)$ при $m = 10$ (рис. 3, б, в) проведением дополнительных построений и использованием формул (1), (2), (7).

Способ 1. Распределение магнитной индукции B^* по ширине пластины b является результатом сложения двух равных затухающих экспоненциальных кривых проникновения магнитной индукции с противоположных сторон пластины [15] (на рис. 3, б – нанесены сплошными тонкими линиями).

Исходя из физического смысла глубины проникновения – уменьшения B^* в $\sqrt{2}$ раз на расстоянии a от поверхности пластины [12], выполняем дополнительные построения (рис. 3, б) и определяем: $a \approx 0,004$ м. Из равенства (1) находим значение коэффициента динамики материала $\xi_{\text{мат}}$ [15]:

$$\xi_{\text{мат}} \approx 12,5.$$

Способ 2. В работах [16, 17] даны практические рекомендации по восстановлению магнитной проницаемости материала $\mu_{\text{мат}}$ по проницаемости пластины $\mu_{\text{пл}}$ через зависимость соответствующих коэффициентов динамики: $\xi_{\text{пл}}(\xi_{\text{мат}})$.

Зависимость $B(H)$ является динамической магнитной характеристикой пластины [16,17], где $B = B_{\text{ср}}$ средняя по сечению магнитная индукция, $H = H_c$ напряженность на границе (поверхности пластины). Определяем их максимальные значения: $B_{\text{м}}$ и $H_{\text{мг}}$ (на рис. 3, в – сплошными тонкими линиями): $B_{\text{м}} = 0,6$ Тл; $H_{\text{мг}} \approx 28$ кА/м.

Вычисляем магнитную проницаемость пластины, как: $\mu_{\text{пл}} = B_{\text{м}} / H_{\text{мг}}$. По формуле (2) при $b = 0,05$ м, $\gamma = 2 \cdot 10^6$ См/м (для стали с 3% Si) и $f = 50$ Гц определяем значение коэффициента динамики пластины $\xi_{\text{пл}}$:

$$\xi_{\text{пл}} \approx 4,1.$$

В работе [17] для случая $\mu = \text{const}$ выведена формула $\xi_{\text{пл}}(\xi_{\text{мат}})$:

$$\xi_{\text{пл}} = \sqrt{\xi \cdot \sqrt{2 \cdot (\cosh \xi - \cos \xi) / (\cosh \xi + \cos \xi)}}, \text{ где } \xi = \xi_{\text{мат}}. \quad (7)$$

Значению $\xi_{\text{пл}} = 4,1$ в (7) соответствует $\xi_{\text{мат}} = 11,9$. Принимаем $\xi_{\text{мат}} = 12$.

Совпадение полученных двумя способами результатов показывает также, что пластины изготовлены из стали с содержанием 3% Si.

Из выражения (2) при $\xi_{\text{мат}} = 12$ определяем значение относительной магнитной проницаемости материала японской электротехнической стали $\mu'_{\perp \text{мат}}$ (в дальнейшем символ «мат» опускается):

$$\mu'_{\perp \text{мат}} = \mu'_{\wedge} \approx 150.$$

На рис. 3, в сплошными тонкими линиями изображена гистерезисная характеристика $B(H)$ материала, построенная в соответствии с найденным значением μ_{\perp} .

V. Определение реальных значений μ_{\perp} отечественных холоднокатаных кремнистых сталей

В работе [10] определение μ_{\perp} листовой стали Ст.3 производилось по потерям $P_{вн}$ прямоугольной пластины от нормального потока Φ_n в П-образном НУ при условии $\xi > 4$, когда под влиянием эффекта вытеснения магнитного потока в формуле (6) появляется зависимость от μ_{\perp} : $P_{вн} \equiv \sqrt{(1 / \mu_{\perp})}$. Исследованиями на пакете прямоугольных пластин [14] фактически доказано, что магнитный поток Φ_n , создаваемый НУ, в тонкой пластине принудительно распределен равномерно, как при $m = 1$ на рис. 3, б, и потери $P_{вн}$ оказываются выше, чем при РПЭ (при $m \geq 10$ на рис. 3, а). Соответственно, расчетное значение μ_{\perp} стали Ст.3 в работе [10] является заниженным (\approx на 40%).

Экспериментальное определение μ_{\perp} листовых сталей проводим на пакете прямоугольных пластин размером (32x100) мм. В отличие от работ [10,14] переменный магнитный поток Φ_n на частоте $f = 50$ Гц создается намагничивающей обмоткой $W_n = 200$, расположенной непосредственно на исследуемом пакете (рис. 4, а). Это обеспечивает свободно затухающее проникновение магнитного потока Φ_n от поверхности во внутренние слои сечения пластин [12].

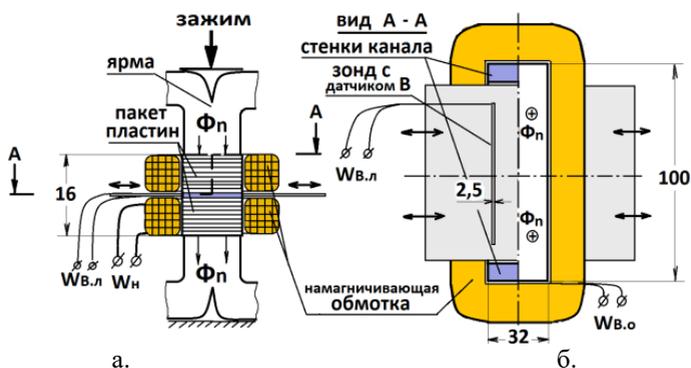


Рис. 4. Определение μ_{\perp} на пакете прямоугольных пластин с замыкающими ярмами

Многослойный пакет толщиной 16 мм и обмотка W_n разделены на две равные секции узким воздушным промежутком с направляющими, образующими поперечный канал для свободного перемещения зонда с локальной измерительной обмоткой магнитной индукции $W_{в.л} = 3$ шириной 2,5 мм (рис. 4, б).

Контроль потока Φ_n осуществляется охватывающей обмоткой $W_{B,o} = 3$. Для обеспечения симметричного распределения и достаточного уровня магнитного потока в прямоугольных пластинах устройство охватывается ярами Ш-образной формы (рис. 4).

На рис. 5 представлены зависимости $B^*(x)$ при значениях $B_m \leq 0,25$ Тл, то есть при условиях, близких к $\mu = \text{const}$, полученные на шихтованных пакетах пластин для стали Ст.3 и трансформаторных сталей марок: Э350, 3404 и 3409.

Как видно из эпюр $B^*(x)$ на рис. 5,б-г, для электротехнических сталей Э350, 3404 и 3409 с возрастающими значениями $\xi = (5,86; 6,67; 7,91)$ при значениях $\mu'_\perp = (85; 110; 155)$ соответствуют и большие уровни затухания индукции в центре пластин. У Ст.3 в пять раз выше, чем у сталей с 3% Si, электропроводность $\gamma = 10^7$ См/м и поэтому наиболее выраженная динамика ($\xi = 10$) при меньшем значении проницаемости $\mu'_\perp = 50$ (рис. 5, а).

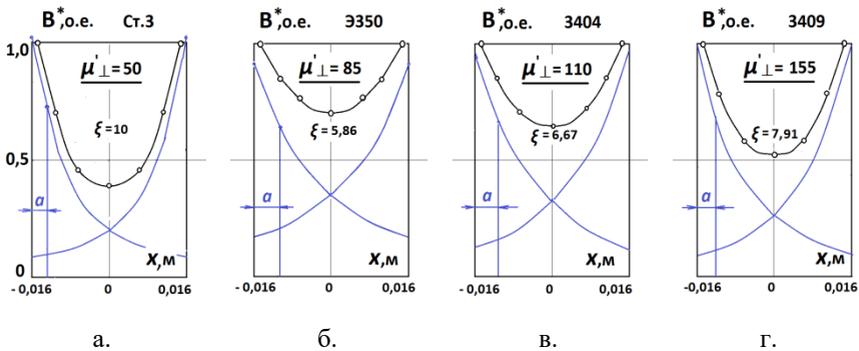


Рис. 5. Экспериментальные зависимости $B^*(x)$ для пластин (32x100) мм листовых сталей: Ст.3, $d = 1,5$ мм (а); сталь Э350, $d = 0,15$ мм (б); сталь 3404, $d = 0,35$ мм (в); сталь 3409, $d = 0,30$ мм (г)

VI. Влияние магнитной индукции B_τ от тангенциального потока Φ_τ на проницаемость μ_\perp

Исследование влияния на проницаемость μ'_\perp наличия магнитной индукции B_τ проводим с использованием предложенной в работе [13] физической модели потерь в стыках № 2, имеющей намагничивающие устройства НУ1; НУ2 с обмотками W_n ; W_{in} для создания и контроля нормального потока Φ_n (рис. 6, а).

Для создания тангенциальной индукции B_τ в образце листовой электротехнической стали вырезано прямоугольное окно и намотаны намагничивающая $W_o = 120$ и измерительная $W_{ит} = 10$ обмотки (рис. 6, б). Для ис-

ключения перехода потока Φ_t в ярма намагничивающих устройств НУ1 и НУ2 на образце сверху и снизу в зонах полюсов НУ наклеены прокладки из текстолита толщиной 1 мм.

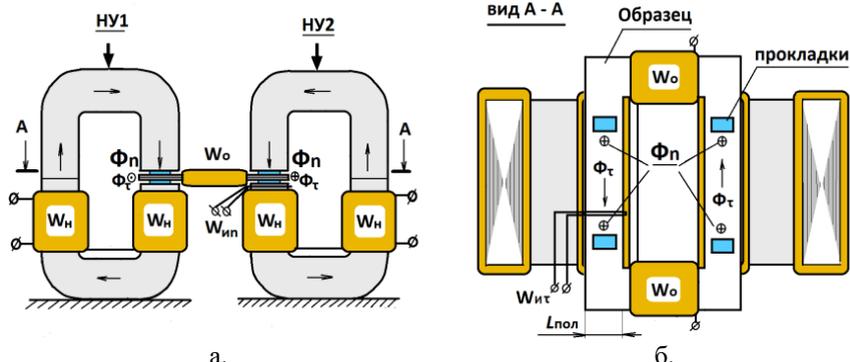


Рис. 6. Определение зависимости μ_{\perp} от тангенциальной составляющей магнитной индукции B_t на физической модели № 2

Методом баланса мощностей [10,13] определены потери $P_{вн}$ в образце при отсутствии и наличии индукции B_t . В соответствии с формулой (5) отношение квадратов значений потерь $P_{вн}$ пропорционально изменению значений магнитной проницаемости μ_{\perp} при наличии тангенциальной составляющей индукции B_t .

Максимальное уменьшение магнитной проницаемости μ_{\perp} от действия тангенциальной составляющей индукции для сталей 3404 и 3409 составило $\approx (15-25)\%$, причем уже при значении амплитуды $B_{мт} = 0,5$ Тл и имеет место снижение на $\approx 10\%$.

VIII. Обсуждение результатов

1. Холоднокатаные трансформаторные стали имеют полосовую доменную структуру [18] и отличаются высоким уровнем магнитных свойств и их повышенной чувствительностью к внешним условиям [19]. Максимальные значения проницаемости μ' в направлении прокатки различных марок этих сталей находятся в широких пределах: $(10^4 - 10^5)$ и более.

Магнитная проницаемость μ_{\perp} исследованных марок трансформаторных сталей различается незначительно и имеет предельно низкие значения < 200 . Проницаемость μ_{\perp} практически не чувствительна к отжигу и различным воздействиям.

2. При сохранении основных закономерностей формирования удельных потерь $P_{уд.вн}$ поверхностный эффект от потоков Φ_n в стыках принципиально отличается от классической задачи проводящей пластины,

рассмотренной в [12], где вихревые токи замыкаются внутри зоны действия переменного магнитного потока и вытесняют его к поверхности пластины пропорционально значению коэффициента динамики ξ . Удельные потери на вихревые токи пропорциональны ширине пластины $P_{уд.в} \equiv b$ и зависят от соотношения линейных размеров L/b (рис. 2, а).

Для нормального потока Φ_n в стыках шихтованных сердечников силовых трансформаторов при низких значениях μ_{\perp} остается справедливым условие $\xi \gg 4$, соответствующее наличию резкого поверхностного эффекта. Магнитные потоки Φ_n в стыках пластины сосредоточены в узких зонах перекрытия, равномерно распределены по ширине пластины независимо от величины ξ ; контуры вихревых токов от действия потоков Φ_n замыкаются по всему периметру пластины за пределами зон стыков. Удельные потери на вихревые токи $P_{уд.вн}$ от потоков Φ_n пропорциональны: $P_{уд.вн} \equiv \sqrt{b}$ и имеют отличающиеся зависимости от соотношения линейных размеров пластин L/b для согласных потоков (+), характерных для ступенчатых стыков типа «step-lap» и встречных (-) потоков стыков (рис. 2, б) для стыков внахлест типа «butt-lap».

3. Следует учитывать, что кроме более высоких относительных значений потерь на вихревые токи P^* при согласных потоках (+) на рис. 2, б в стыках типа «step-lap» при одинаковых уровнях рабочего потока и прочих равных условиях в магнитных системах силовых трансформаторов нормальный поток Φ_n имеет вдвое большие значения, чем в стыках типа «butt-lap» при встречных потоках (-). При этом абсолютные значения удельных потерь $P_{уд.вн}$ в стыках типа «step-lap» оказываются до 4 раз выше, чем в стыках типа «butt-lap» [11].

VIII. Выводы

1. В шихтованных сердечниках силовых трансформаторов имеет место резкий поверхностный эффект от действия нормальных составляющих магнитного потока в стыках. Удельные потери на вихревые токи от нормальных потоков в стыках замыкаются в пластинах за пределами зон перекрытия стыков и зависят от взаимного направления потоков: встречного – для стыков внахлест типа «butt-lap» и согласного – для ступенчатых стыков типа «step-lap».

2. Потери на вихревые токи от нормального потока в стыках находятся в зависимости от магнитной проницаемости листовой электротехнической стали в перпендикулярном направлении к плоскости прокатки. Последние имеют предельно низкие значения, мало отличаются для различных марок сталей, нечувствительны к внешним воздействиям.

3. Независимо от используемых марок кремнистых сталей силовых трансформаторов, поверхностный эффект и удельные потери на вихревые токи от нормальных магнитных потоков в стыках находятся в зависимости

только от геометрических параметров шихтованных магнитных системах: толщины и ширины пластин, конструктивных особенностей стыков.

© Калинин Е.В., 2019

© Чивенков А.И., 2019

Библиографический список

- [1] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- [2] Černý V. Příspěvek k problematice viřivých proudů ve spojích transformátorových plechů // Elektrotechnický obzor, SV72. 1983. № 11. P. 651-652.
- [3] Nakata T., Kawase Y., Nakano M. Accuracy of magnetic field strength measurement by single sheet testers // Electrical Engineering in Japan. 1987. № 107 (1). P. 50-58.
- [4] Левин М.И., Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // Электротехніка і Електромеханіка. 2014. № 1. С. 40-43.
- [5] Moses A.J., Sakaida A. Effect of distorted flux density on three phase transformer cores assembled from high quality electrical steels // IEEE Transactions on Magnetics. 1986. № 22 (5). P. 532-534.
- [6] Кравченко А.Н. Анализ эффективности мероприятий по снижению добавочных потерь в мощных силовых трансформаторах // IV Респ. научн.-техн. конф. «Современные проблемы энергетики. Электроэнергетическое оборудование», октябрь 1985, Киев. С. 88-89.
- [7] Калинин Е.В. Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь // IV Всерос. научн.-техн. конф. «Актуальные проблемы электроэнергетики», 2018, Нижний Новгород, Россия. С. 53-61.
- [8] Калинин Е.В., Чернов А.И. Потери в стыках шихтованных сердечников. Исследование возможностей снижения прироста потерь // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 4 (123). С. 123-134.
- [9] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Прогнозирование прироста потерь в стыках сердечников силовых трансформаторов // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 3. С. 87-101.
- [10] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Физическая модель потерь в стыках шихтованных сердечников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 1 (124). С. 109-118.
- [11] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Анализ конструкций стыков шихтованных магнитных систем силовых трансформаторов // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1 (5). С. 69-83.
- [12] Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. М.: Изд-во Энергия, 1967. – 208 с.
- [13] Калинин Е.В., Чивенков А.И. Исследование нормальной составляющей магнитного потока в стыках шихтованных сердечников // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 3 (7). С. 86-101.

- [14] Yagisawa T., Takekoshi Y., Wada S. Magnetic properties of laminated steel sheets for normal fluxes // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1982. № 26. P. 340-342.
- [15] Васютинский С.В. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
- [16] Калинин Е.В. Определение кривой намагничивания листовых электротехнических сталей на переменном токе // Электрооборудование промышленных установок. 1988. С. 113-116.
- [17] Калинин Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 2 (121). С. 96-105.
- [18] Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Наука, 1992. – 272 с.
- [19] Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Энергия, 1974. – 240 с.

E.V. Kalinin, A.I. Chivenkov

SHARP SURFACE EFFECT IN JOINTS OF LAMINATED CORES OF POWER TRANSFORMERS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The conditions of dynamic processes from the action of the normal component of the magnetic flux Φ_n in the overlapping zone of the joints of the laminated cores of power transformers are considered. Studies have shown that the formation of losses due to eddy currents P_{en} from flows Φ_n at the joints occurs with a sharp surface effect when the dynamics coefficient $\xi > 4$. Using the results of physical modeling of losses P_{en} at the joints of a rectangular conducting plate, distinctive features of a sharp surface effect at the joints are determined. The normal flux Φ_n acts in two narrow zones of overlapping joints along the edges of steel plates and has a uniform distribution over the width b . The eddy current circuits are closed around the entire perimeter of the plates outside the flows Φ_n , and the specific losses $P_{s,en}$ depend on the ratio of linear dimensions L / b , where L is the length of the plate. The specific losses $P_{s,en}$ depend on the mutual direction of the fluxes Φ_n along the plate edges: consonant – for step joints of the «step-lap» type or counter-flow – for overlaps of the «butt-lap» type. Losses $P_{s,en}$ at the joints retain the general character of the dependence on the magnetic flux amplitude Φ_{nm} , frequency f , electrical conductivity γ , but they change the dependence on the plate width b and depend on the magnetic permeability in the perpendicular direction to the plane of the plates of electro-technical steels μ_{\perp} , information about which are absent in literary sources. Using a special magnetizing device at a frequency of $f = 50$ Hz under conditions of a sharp surface effect from normal magnetic flux, experimental studies of the distribu-

tion of magnetic induction over the width of rectangular samples (32x100) mm of transformer steels E350, 3404, 3409 have been conducted. The real values of the relative magnetic permeability of the silicon steels μ_{\perp} . The latter have low values not exceeding $\mu_{\perp} < 200$. Studies have shown that the magnetic permeability μ_{\perp} for various electrical steels differs slightly, is not sensitive to annealing and other external influences, has a weak dependence on the magnetic induction of the main tangential flow of the laminated core.

Keywords: dynamic coefficient, eddy currents, electrical steel, laminated core laminated core, loss at the joints, magnetic permeability, normal component of the magnetic flux, physical model, power transformers, sharp surface effect.

References

- [1] P.M. Tikhomirov, *Raschet transformatorov (Calculation of transformers)*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [2] V. Černý, «Příspevek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů», *Elektrotechnický obzor, SV72*, vol. 11, pp. 651-652, 1983 (in Czech).
- [3] T. Nakata, Y. Kawase and M. Nakano, «Accuracy of magnetic field strength measurement by single sheet testers», *Electrical Engineering in Japan*, vol. 107, no. 1, pp. 50-58, Jan./Feb. 1987.
- [4] M.I. Levin, I.V. Pentegov, S.V. Rymar and A.V. Lavrenyuk, «Analysis of three-phase power transformer laminated magnetic core designs», *Electrical engineering & Electromechanics*, vol. 1, pp. 40-43, 2014.
- [5] A.J. Moses and A. Sakaida, «Effect of distorted flux density on three phase transformer cores assembled from high quality electrical steels», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 22, no. 5, pp. 532-534, Sep. 1986.
- [6] A.N. Kravchenko, «Analiz effektivnosti meropriyatiy po snizheniyu dobavochnykh poter' v moshchnykh silovykh transformatorakh (Analysis of the effectiveness of measures to reduce additional losses in powerful power transformers)», in proc. *IV Rep. sci.-tech. conf. «Sovremennye problemy energetiki. Elektroenergeticheskoe oborudovanie (Modern problems of energy. Power Equipment)»*, 1985, Kiev, pp. 88-89 (in Russian).
- [7] E.V. Kalinin, «Poteri v stykah shihtovannykh serdechnikov. Chast' 1. Ehksperimental'noe issledovanie osnovnykh vliyayushchih faktorov prirosta ehlektromagnitnykh poter' (Losses at the joints of the laminated cores. Part. 1. An experimental study of the main influencing factors of the increase in electromagnetic losses)», in proc. *IV All-Russian conf. «Aktual'nye problemy energetiki (Actual problems of the electric power industry)»*, pp. 53-61, 2018 (in Russian).
- [8] E.V. Kalinin and A.I. Chernov, «Losses at the joints of laminated cores. Investigation of the possibilities of reducing the increase of losses», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (123), pp. 123-134, 2018.
- [9] E.V. Kalinin and A. I. Chivenkov, «Forecasting the increase of losses in joints of power transformers core», *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 87-101, 2018.
- [10] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov, «Physical model of losses at joints of laminated cores», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 1 (124), pp. 109-118, 2019.

-
- [11] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov, «Analysis of constructions of joints of laminated magnetic systems of power transformers», *Smart Electrical Engineering*, no. 1 (5), pp. 69-83, March 2019.
- [12] J. Lammeraner and M. Shtaf, *Vikhrevyye toki (Eddy Currents)*. Moscow: Energiya, 1967 (in Russian).
- [13] E.V. Kalinin and A.I. Chivenkov, «Study of magnetic flow normal component in joints of laminated cores», *Smart Electrical Engineering*, no. 3 (7), pp. 86-101, Sept. 2019 (in Russian).
- [14] T. Yagisawa, Y. Takekoshi and S. Wada, «Magnetic properties of laminated steel sheets for normal fluxes», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 26, pp. 340-342, 1982.
- [15] S.V. Vasyutinskiy, *Voprosy teorii i rascheta transformatorov (Questions of theory and calculation of transformers)*. St. Petersburg: Energiya, 1970 (in Russian).
- [16] E.V. Kalinin, «Opredeleniye krivoy namagnichivaniya listovykh elektrotekhnicheskikh staley na peremennom toke (Determination of the magnetization curve of sheet electrotechnical steels with alternating current)», *Elektrooborudovaniye promyshlennykh ustanovok*, pp. 113-116, 1988 (in Russian).
- [17] E.V. Kalinin, «Magnetic field in an anisotropic laminated magnetic core. Part 1. Recommendations for determining the degree of magnetic anisotropy of cold-rolled electrical steels», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 2 (121), pp. 96-105, 2018.
- [18] V.A. Zaykova, I.E. Startseva and B.N. Filippov, *Domennaya struktura i magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley (Domain structure and magnetic properties of electrical steel)*. Moscow: Nauka, 1992 (in Russian).
- [19] V.V. Druzhinin, *Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley (Magnetic properties of electrical steel)*. Moscow: Energiya, 1974, P. 240 (in Russian).

УДК 62-83

А.Ю. Смирнов ^{1,2}, В.И. Чеботарь ³, Л.В. Кузнецова ⁴

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕТРАКТОРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПЛАСТИЧЕСКОЙ ХИРУРГИИ

¹ Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

² Опытное конструкторское Бюро Машиностроения
им. И.И. Африкантова

³ ООО «Центр хирургии»

⁴ Московский государственный университет пищевых производств

Представлены конструкции хирургических ретракторов – инструментов для проведения операции эндоскопической маммопластики. На основании анализа их потребительских качеств сделан вывод о перспективности разработки электромагнитного инструмента, который обеспечивает удержание тканей при проведении операции посредством электромагнитного поля, воздействующего на постоянный магнит, помещённый за удерживаемыми тканями. Рассмотрена конструкция электромагнита для хирургического ретрактора, выбраны материалы и определены размеры. Методом конечных элементов на осесимметричной сеточной модели выполнены расчёты электромагнитной силы, с которой электромагнит воздействует на постоянный магнит при различной глубине его погружения в ткани. Отмечено нелинейное нарастание силы притяжения постоянного магнита электромагнитом с уменьшением расстояния между ними, т.е., с уменьшением глубины заложения постоянного магнита в ткани. Для предотвращения чрезмерной убыли силы притяжения магнита при большой глубине его заложения в ткани предусмотрено размещение дополнительного постоянного магнита небольших размеров на внутреннем полюсе электромагнита. Предложенный электромагнитный инструмент после проведения соответствующих испытаний может быть внедрён в практику врачей-хирургов и повысит качество операций.

Ключевые слова: хирургический ретрактор, электромагнит, электромагнитный ретрактор.

1. Введение

Ежегодно в мире производится сотни тысяч увеличивающих маммопластик и число их постоянно растёт. Значительная часть этих операций выполняется через подмышечный доступ с применением эндоскопической техники [1]. Число эндоскопических вмешательств с целью увеличения молочных желез также растёт год от года и, по некоторым оценкам, при-

мерно половине первично-обратившихся к пластическому хирургу пациентов может быть показано использование подмышечного доступа и эндоскопической техники при проведении увеличивающей маммопластики [2]. Таким образом, в мире наблюдается отчетливый рост социального заказа на этот тип хирургических вмешательств.

Эндоскопический этап операции, а именно – формирование имплантационного кармана, часто представляет определенные трудности для хирурга в связи с ограниченным пространством для манипуляций и ограниченной доступностью некоторых зон формируемого кармана для рабочих участков применяемых эндоскопических инструментов [2]. При работе в формируемом имплантационном кармане хирургу также приходится постоянно преодолевать давление отслоенного поверхностно-расположенного лоскута тканей, который под действием гравитации и собственной силы упругости стремится вернуть естественное положение на торсе пациента.

II. Состояние вопроса

В настоящее время производителями хирургического инструментария достигнуты определенные успехи на пути решения данных проблем. Для удобства оперирующего хирурга предложены разнообразные варианты крючков, ретракторов, зеркал и иных инструментов, предназначенных для коррекции формы имплантационного кармана в процессе эндоскопического этапа операции. В частности, получил применение грудной диссектор марки 50251 DE по ECKERT, фирмы Karl Storz GmbH & Co. По форме этот инструмент напоминает «кочергу» (рис. 1), его рабочий конец – тупоконечный, загнутый, предназначен для непосредственного поднятия и натяжения тканей в области производимых хирургом манипуляций, на другом конце имеется адаптированная для удержания рукой ассистента рифленая ручка цилиндрической формы.



Рис. 1. Хирургический диссектор марки 50251 DE

Ассистент хирурга держит инструмент за ручку, погружает его через разрез кожи в формируемый имплантационный карман и рабочим концом диссектора осуществляет непосредственное поднятие и натяжение тканей в области текущих хирургических манипуляций.

Данный инструмент имеет ряд недостатков. Во-первых, перемещение поверхностных тканей грудным диссектором данного типа ограничи-

вается фиксированным положением той его части, которая при работе в ране находится в области небольшого кожного разреза: данный диссектор приподнимает поверхностные ткани через создаваемый рычаг с точкой опоры в области подмышечного разреза кожи. Таким образом, движение натягивающего и приподнимающего ткани конца инструмента по дуге всегда направлено в сторону хирурга-оператора, что не позволяет создать нужный, близкий к прямому угол расхождения между грудной клеткой и поднимаемым лоскутом поверхностных тканей по краям формируемого кармана. Во-вторых, ручка для удержания инструмента, имеет цилиндрическую форму, поэтому, несмотря на свою рифленую поверхность, относительно легко проворачивается в удерживающей руке ассистента при ротации рабочего конца под действием силы упругости комплекса приподнимаемых поверхностных тканей. Это нарушает экспозицию тканей в ране и увеличивает общее время операции за счет времени, необходимого для восстановления требуемого взаимного положения тканей. В-третьих, для эффективного удержания инструмента погруженным в рану через малый кожный разрез в подмышечной области ассистенту необходимо стоять очень близко к оперирующему хирургу, что может создавать неудобства для оперирующего хирурга и ограничивать свободу его движений.

Более совершенный прибор (производитель Karl Storz GmbH & Co) снабжается шпателем-козырьком для поднятия тканей и тубусом для оптики HOPKINS™ II 50253 BA. Он имеет прямой корпус с перпендикулярно расположенной к нему ручкой, предназначенной для удерживания инструмента хирургом-оператором, и имеет на конце удлиненный козырек в форме перевернутой лопатки для поднятия тканей над объективом видеокамеры и источником света (рис. 2).

Конструкция данного инструмента не подразумевает его удерживания ассистентом хирурга. Инструмент занимает одну руку оперирующего хирурга на весь срок эндоскопического этапа операции, ограничивая возможности оператора по ряду манипуляций и физически утомляя оперирующего хирурга. Кроме того, позиционирование поверхностных тканей данным инструментом ограничивается фиксированным положением той его части, которая во время работы находится в области небольшого (4-7 см) кожного разреза в подмышечной области.

Ретрактор такого типа (марка 50251 LG) приподнимает поверхностные ткани через создаваемый рычаг с точкой опоры в области подмышечного разреза кожи таким образом, что движение натягивающего и приподнимающего ткани конца инструмента по дуге всегда направлено в сторону хирурга-оператора. Это не позволяет создать нужный, близкий к прямому угол расхождения между грудной клеткой и поднимаемым лоскутом поверхностных тканей по краям формируемого кармана. Кроме того, обозна-

ченный выше шпатель-козырек в конструкции ретрактора в процессе операции прилегает непосредственно к нижней отслоенной поверхности большой грудной мышцы в отслоенном комплексе поверхностных тканей. При перемещении шпатель-козырек может легко проскальзывать между пересеченными в процессе операции волокнами большой грудной мышцы, расслаивая и отрывая их, чем значительно усугубляет травматизацию большой грудной мышцы.



Рис. 2. Усовершенствованный прибор Karl Storz GmbH & Co., снабженный шпателем-козырьком для поднятия тканей

III. Описание электромагнитного устройства

Прогресс в области разработки, массового производства и удешевления энергонасыщенных постоянных магнитов, обозначившийся в последние годы, позволяет оценить перспективные аналоги рассмотренных устройств, основанные на удержании тканей при формировании имплантационного канала посредством магнитного поля. Для этого ручка ретрактора сопрягается с электромагнитом 1 (рис. 3), а в формируемый имплантационный канал тела человека вводится мощный постоянный магнит 2 относительно небольших размеров. В результате взаимодействия (притяжения) полей катушки 3 электромагнита и внедрённого постоянного магнита в асептической оболочке 4 создаётся электромагнитная сила, обеспечивающая подъем и удержание тканей в нужном положении при проведении пластической операции.

Наиболее подходящим материалом для вводимого постоянного магнита являются сплавы на основе самария и кобальта. Они могут создать сильные магнитные поля при малых габаритах, обладают высокой

температурной и временной стабильностью характеристик, а также относительно высокой устойчивостью к коррозионным процессам.

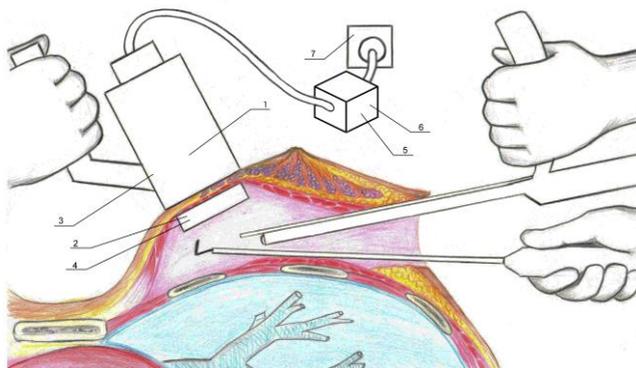


Рис. 3. Схема использования электромагнита при проведении пластической операции по увеличению груди:

- 1 – электромагнит, 2 – постоянный магнит, 3 – катушка электромагнита, 4 – введённый постоянного магнита в асептической оболочке, 5 – источник постоянного напряжения, 6 – устройство регулирования, 7 – розетка

Материал допускает нагрев при дезинфицирующей термообработке до 350 °С. Характеристики одного из сплавов группы, не самого лучшего по параметрам, но освоенного промышленностью и широко применяемого в различных областях техники, марки КС25ДЦ [4] производства ООО «ПОЗ-Прогресс», представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики материала постоянного магнита марки КС25ДЦ

Температура, °С	20	355	450	550
Индукция холостого хода, Тл	0,9	0,72	0,64	0,56
Коэрцитивная сила, А/м	680	512	376	210

Электромагнит с заданными свойствами получает питание от источника постоянного напряжения 5, сопряженного с устройством регулирования 6, который соединен с однофазной сетью через обычную розетку 7 (рис. 3). При этом электромагнит образует на поверхности, пересекающей кожу груди, два концентричных полюса противоположной полярности: внешний, в форме кольца и внутренний, в форме круга.

В формируемый имплантационный карман помещается цилиндрический магнит в форме диска, ось магнита совпадает с осью магнитопровода. Стерильный магнитопровод устанавливается в операционную рану с соблюдением правил асептики и антисептики. Поле электромагнита взаимодействует с полем постоянного магнита поля цилиндрического магнитопровода и оказывает на него притягивающее действие, проникая через кожу, подкожно-жировую клетчатку и большую грудную мышцу. При притяжении постоянного магнита к электромагниту происходит сжатие и фиксация комплекса поверхностных тканей между притягиваемыми элементами.

Таким образом, осуществляется механическое сжатие комплекса тканей, и через сжатие – фиксация комплекса тканей между взаимодействующим электромагнитом, установленным на поверхности тела пациента, и магнитопроводом внутри операционной раны. Фиксированный между электромагнитом и магнитопроводом комплекс тканей удобно перемещать и натягивать в необходимом направлении, в зависимости от текущих нужд оперирующего хирурга. Это делает возможным точнее контролировать изменение геометрии формируемого имплантационного кармана и экспозиции тканей в операционной ране, что в свою очередь повышает удобство работы оперирующего хирурга, увеличивает скорость и точность его манипуляций, снижает вероятность интра- и постоперационных осложнений, снижает общую продолжительность операции и наркоза.

IV. Математическая модель и результаты расчетных исследований

Для расчета силы механического сжатия и фиксации тканей человека при проведении операции, по воздействию на постоянный магнит со стороны электромагнита, разработана сеточная модель (рис. 4,а). Модель содержит осесимметричные области, относящиеся к магнитопроводу электромагнита, постоянным магнитам, обмотке электромагнита, и немагнитные промежутки между постоянным магнитом и электромагнитом, замещающие притягиваемые ткани. Она позволяет рассчитать двухмерное поле в области сечения исследуемых областей методом конечных элементов (рис. 4,б) [5], а затем вычислить электромагнитную силу [6], действующую на постоянный магнит.

В ходе расчётных исследований установлено, что лучшие результаты, а именно большие усилия при глубоком заложении магнита в ткани, обеспечивает конструкция, снабженная дополнительным постоянным магнитом небольших размеров на внутреннем полюсе электромагнита, как это представлено на сеточной модели (рис. 4,а).

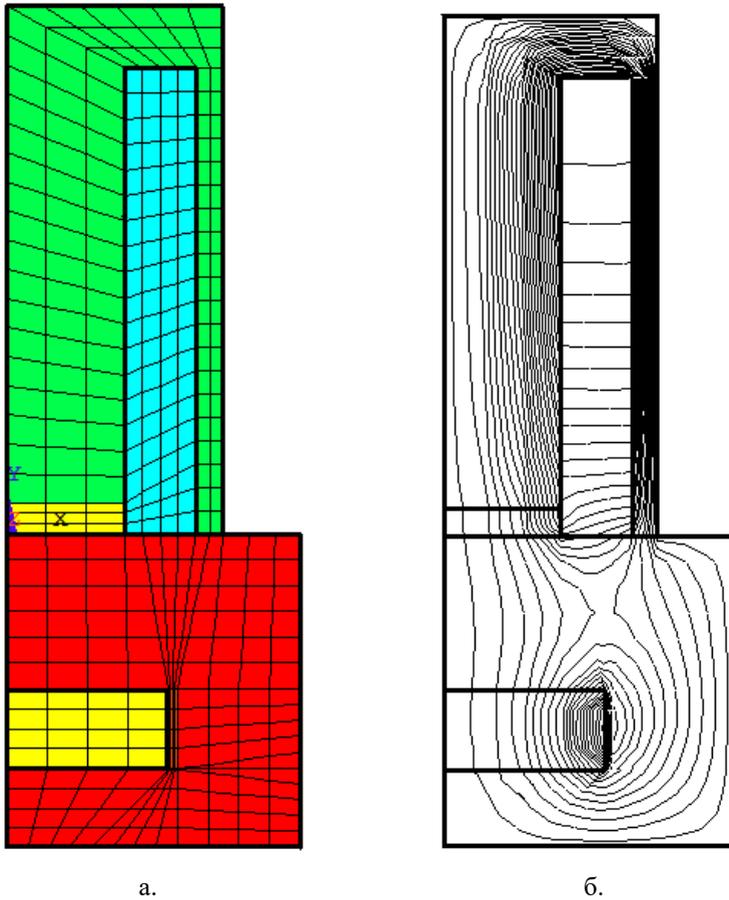


Рис. 4. Сеточная модель электромагнита, воздействующего на постоянный магнит в не ферромагнитной среде (а) и рассчитанное на ней распределение поля в расчетной области (б)

Расчеты проведены для электромагнита с внешним диаметром (по магнитопроводу) 70 мм и общей высотой 85 мм, при плотности тока в обмотке, при которой нагрев корпуса электромагнита не оказывает воздействия на кожные покровы врача и пациента. Они выявили резко выраженную зависимость силы притяжения магнита от глубины его погружения (табл. 2).

Таблица 2.
Зависимость силы притяжения магнита
от расстояния до электромагнита

Расстояние до электромагнита, см	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Сила притяжения, Н	63,1	92,1	143,3	225,3	385,6

При расстояниях менее 1 см наблюдается чрезмерный рост силы притяжения, способный вызвать защемление мягких тканей пациента. Во избежание травм ретрактор на основе рассмотренного электромагнита следует использовать в комплекте с дополнительными немагнитными прокладками, ограничивающими чрезмерное приближение к нему внедряемого постоянного магнита, либо снабдить устройство регулирования напряжения б системой уменьшения тока по сигналам датчика положения. Он может быть выполнен на элементе Холла, во взаимодействии с полем внедряемого магнита [7].

V. Разработка макета

Для магнитопровода макета электромагнита подходит обычная конструкционная сталь: сталь 10 или сталь 20 [8]. При этом внутренний и внешний полюсы могут быть изготовлены отдельно и затем соединены вместе посредством резьбового соединения.

Число витков и обмоточные данные катушки электромагнита рассчитываются, исходя из размеров обмоточного окна и номинального напряжения [10]. Обмоточные данные низковольтной катушки электромагнита с приведёнными выше габаритными характеристиками представлены в табл. 3.

Таблица 3.
Расчет обмоточных данных катушки электромагнита

Наименование параметра	Значение
Внутренний диаметр обмоточного окна, за вычетом катушечной изоляции, мм	18
Наружный диаметр обмоточного окна, за вычетом катушечной изоляции, мм	30
Высота (осевая длина) обмотки, мм	72
Плотность тока, А/мм ²	6,0
Коэффициент заполнения медью площади обмоточного окна [9]	0,72
Диаметр провода (марки ПЭТ-200) в изоляции/без изоляции, мм	0,50/0,552
Число витков	735
Номинальный ток, А	1,18
Средняя длина витка, м	0,0754
Активное сопротивление катушки, Ом	4,95

Продолжение табл. 3.

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение, В	5,8
Потребляемая мощность, Вт	6,84

Полная электрическая схема для питания обмотки электромагнита должна содержать регулируемый источник постоянного напряжения мощностью не менее 7 Вт или выпрямитель, понижающий трансформатор и регулируемый, ступенчато или плавно, источник переменного напряжения соответствующей мощности.

После изготовления и отладки устройства предполагается всестороннее его тестирование на макетах и имитаторах.

VI. Вывод

Создание электромагнитного ретрактора может стать новым интересным направлением применения электромагнитных устройств в медицине, обеспечивающим повышение качества проведения весьма востребованной в современной практике хирургической операции.

© Смирнов А.Ю., 2019

© Чеботарь В.И., 2019

© Кузнецова Л.В., 2019

Библиографический список

- [1] Курс пластической хирургии: Руководство для врачей. В 2-х томах. Т. II: Молочная железа. Туловище и нижняя конечность. Кисть и верхняя конечность. Под ред. К.П. Пшениснова. Ярославль, Рыбинск: Изд-во ОАО Рыбинский дом печати, 2010. – 665 с.
- [2] Wang C., Chen L., Mu D., Xin M., Luan J. A low-cost simulator for training in endoscopic-assisted transaxillary dual-plane breast augmentation // Annals of plastic surgery. 2017. № 79 (6). P. 525-528.
- [3] Strock L.L. Transaxillary endoscopic silicone gel breast augmentation // Aesthetic surgery journal. 2010. № 30 (5). P. 745-755.
- [4] ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спечённые. Марки. Введ. 1977-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1976. – 43 с.
- [5] Фисенко В.Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 44 с.
- [6] Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.
- [7] Смирнов А.Ю., Шаров А.В. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями. Н. Новгород: НГТУ, 2017. – 193 с.
- [8] Константинов О.Я. Расчёт и конструирование магнитных и электромагнитных приспособлений. Л.: Машиностроение, 1967. – 315 с.

- [9] Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
- [10] Ротерс Г.К. Электромагнитные механизмы. М.; Л.: ГЭИ, 1949. – 523 с.

A.Yu. Smirnov^{1,2}, **V.I. Chebotar**³, **L.V. Kuznetsova**⁴

DESIGN OF ELECTROMAGNETIC SURGICAL RETRACTOR FOR PLASTIC SURGERY APPLICATION

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

² Africantov Experimental Design Bureau for Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

³ The «Center of Surgery» Co Ltd
Nizhny Novgorod, Russia

⁴ Moscow State University of Food Production
Moscow, Russia

Abstract. Designs of instruments intended for the operation of endoscopic mammoplasty - surgical retractors are presented. On the base of analysis their consumer qualities a conclusion on prospective development of electromagnetic tool has been drawn, which ensures tissue retention during an operation, by means of an electromagnetic field acting on a permanent magnet placed back from retained tissues. The electromagnet design for surgical retractors application is considered, which consists from inner and outer concentric equal-area poles, locked by common armature, and winding, placed between them. The magnetic materials and dimensions have been selected. The calculations of the permanent magnet attraction electromagnetic force at various depths of immersion in tissue have been executed. The calculations have been performed by the finite element method on an axisymmetric grid model. A nonlinear increase in the attractive force of a permanent magnet by an electromagnet is noted with a decrease in the distance between them, i.e. with a decrease in the depth of the permanent magnet in the tissue. To prevent an excessive decrease in the force of attraction of the magnet with a large depth of its insertion into the tissue, it is provided that an additional permanent magnet of small sizes be placed at the inner pole of the electromagnet. Dimensions have been selected, winding data have been calculated, and prototype parts have been made. It is assumed that after comprehensive studies on models and simulators, and tests on living tissues, the considered electromagnetic instrument can be introduced into the practice of surgeons to improve the quality of operations.

Keywords: electromagnet, electromagnetic retractor, surgical retractor.

References

- [1] K.P. Pshenisnov, *Kurs Plasticheskoy Hirurgii: Rukovodstvo dlya Vrachey (Plastic Surgery Course: A Guide for Physicians)*. Yaroslavl, Rybinsk: Izd. Rybinskiy dom pečati, 2010 (in Russian).
- [2] C. Wang, L. Chen, D. Mu, M.Xin and J. Luan, «A Low-Cost Simulator for Training in Endoscopic-Assisted Transaxillary Dual-Plane Breast Augmentation», *Annals of Plastic Surgery*, vol. 79 (6), pp. 525-528, Dec. 2017.
- [3] L.L. Strock, «Transaxillary endoscopic silicone gel breast augmentation», *Aesthetic Surgery Journal*, vol. 30 (5), pp. 745-755, Sept. 2010.
- [4] Magnetically hard sintered materials. Marks, GOST 21559-76, July 1977 (in Russian).
- [5] V.G. Fisenko, *Chislennyye raschety elektromagnitnykh poley v elektricheskikh mashinakh na osnove metoda konechnykh elementov (Numerical calculations of electromagnetic fields in electric machines based on the finite element method)*. Moscow: MPEI, 2002 (in Russian).
- [6] A.V. Ivanov-Smolenskiy, *Elektromagnitnyye sily i preobrazovaniye energii v elektricheskikh mashinakh (Electromagnetic forces and energy conversion in electric machines)*. Moscow: Vysshaya shkola, 1989 (in Russian).
- [7] A.Yu. Smirnov and A.V. Sharov, *Elektroprivod s beskontaktnymi sinkhronnymi dvigatelyami (Electric drive with contactless synchronous motors)*. Nizhniy Novgorod: NNSTU, 2017 (in Russian).
- [8] O.Ya. Konstantinov, *Raschet i konstruirovaniye magnitnykh i elektromagnitnykh prisposobleniy (Calculation and design of magnetic and electromagnetic devices)*. St. Petersburg: Mashinostroyeniye, 1967 (in Russian).
- [9] O.D. Goldberg, Ya.S. Gurin and I.S. Sviridenko, *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin (Design of electrical machines)*. Moscow: Vysshaya shkola, 1984 (in Russian).
- [10] G.C. Roters, *Elektromagnitnyye mekhanizmy (Electromagnetic mechanisms)*. Moscow; St. Petersburg: GEI, 1949 (in Russian).

УДК 621.31**П.В. Терентьев, Д.А. Филатов,
А.Ю. Захаров, А.С. Симонов****РАССМОТРЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ
ПОДКЛЮЧЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ОБЪЕКТОВ
СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ**

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

Рассмотрены схемы подключения энергоустановок на основе фотоэлектрических солнечных модулей (ФСМ), что связано с перспективой использования нетрадиционных источников энергии в сельской местности. Проведено сравнение первоначальных затрат на их приобретение. Исследованы перспективы использования схем автономного и гибридного подключения энергоустановок на основе ФСМ, дано технико-экономическое обоснование. Сделаны выводы об эффективности схем сетевого подключения энергоустановок на основе ФСМ, а также о необходимости развития нормативного-правового обеспечения в области нетрадиционных источников энергии.

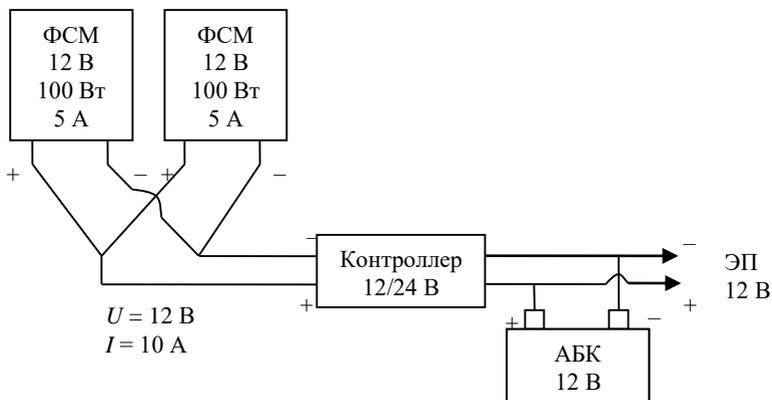
Ключевые слова: нетрадиционные источники энергии, схемы подключения, фотоэлектрические солнечные модули, электротехнические комплексы, энергоэффективность.

I. Введение

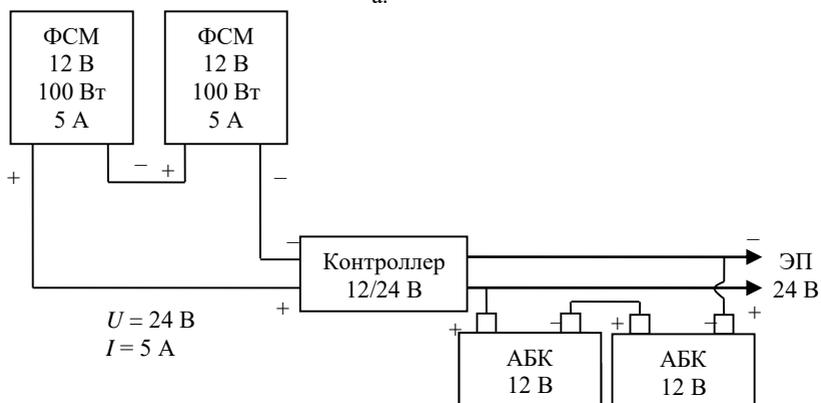
В соответствии со «Стратегией устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года» в сфере электроснабжения предстоит максимально использовать возможности применения для электроснабжения сельских населенных пунктов нетрадиционных источников энергии (солнечные батареи, ветроэнергетические установки, мини-гидроэлектростанции, биогазовые установки и др.) [1-3]. Применение нетрадиционных источников энергии позволит повысить энергоэффективность и снизить нагрузки на централизованную электросеть, повысить качество электрической энергии в сети [4-8]. В связи с этим, применительно к электротехническим комплексам объектов сельской местности проведено сравнение различных схем подключения энергоустановок на основе фотоэлектрических солнечных модулей (ФСМ).

II. Автономная солнечная электростанция для питания нагрузки постоянного тока

На рис. 1 приведены схемы реализации автономной солнечной электростанции для питания нагрузки постоянного тока напряжением 12/24 В (DC/DC). В табл. 1 представлено сравнение затрат на приобретение оборудования для данных схем.



а.



б.

Рис. 1. Схемы автономного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24 В DC/DC: 12 В (а); 24 В (б)

АБК – аккумуляторная батарея; ФСМ – фотоэлектрический солнечный модуль; ЭП – электроприемник постоянного тока

Таблица 1.
Сравнение затрат на реализацию схем автономного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24 В DC/DC

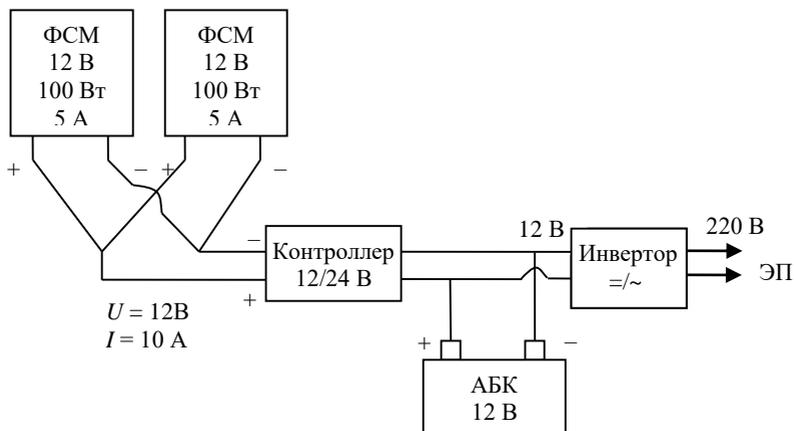
№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.	Цена за ед., руб.	Цена всего, руб.
12 В (DC/DC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	Коннектор DELTA MC4Y Cable	1	595	595
3	Коннектор Delta MC4 AB	1	150	150
4	Контроллер DELTA PWM 2420	1	1615	1615
5	Аккумуляторная батарея Delta GEL 12-100	1	15990	15990
6	Провод ПВС 2х6	10	96,9	969
7	Провод ПВЗ 16	2	111	222
За оборудование			Итого	27721
24 В (DC/DC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	Коннектор Delta MC4 AB	1	150	150
3	Контроллер DELTA PWM 2410	1	915	915
4	Аккумуляторная батарея Delta GEL 12-55	2	8990	17980
5	Провод ПВС 2х4	10	68,5	685
6	Провод ПВЗ 16	2	111	222
За оборудование			Итого	28132

* Цены на оборудование энергоустановки на основе ФСМ взяты с сайта www.onlinetrade.ru [9].

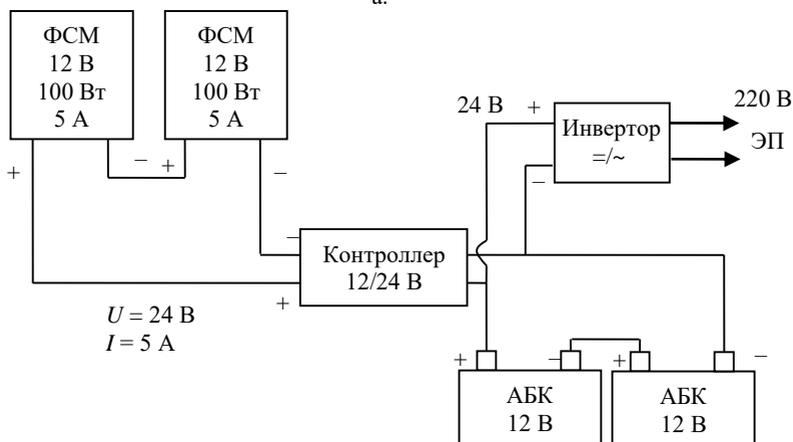
Из приведенных в табл. 1 данных можно сделать вывод, что меньшие затраты на приобретение оборудования требуются для схемы подключения ФСМ на 12 В. Основная доля затрат при реализации схемы автономного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/DC приходится на аккумуляторные батареи (АКБ) (до 64 %), далее следуют ФСМ (до 29,5 %).

III. Автономная солнечная электростанция для питания нагрузки переменного тока

На рис. 2 приведены схемы реализации автономной солнечной электростанции для питания нагрузки переменного тока напряжением 220 В (DC/AC). В табл. 2 представлены затраты на приобретение оборудования.



а.



б.

Рис. 2. Схема автономного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/AC: 12/220 В (а); 24/220 В (б)
 АБК – аккумуляторная батарея; ФСМ – фотоэлектрический солнечный модуль;
 ЭП – электроприемник переменного тока

Таблица 2.
Сравнение затрат на реализацию схем автономного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/AC

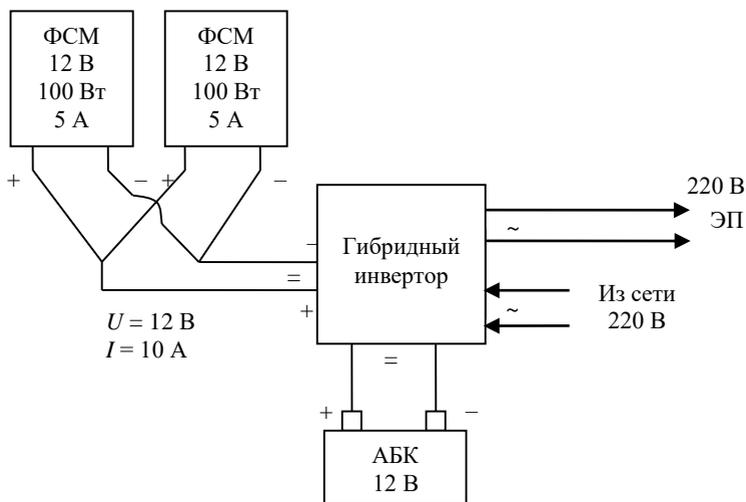
№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.	Цена за ед., руб.	Цена всего, руб.
12/220 В (DC/AC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	Контроллер DELTA PWM 2420	1	1615	1615
3	Аккумуляторная батарея Delta GEL 12-100	1	15990	15990
4	Коннектор DELTA MC4Y Cable	1	595	595
5	Коннектор Delta MC4 AB	1	150	150
6	Инвертор ИС3-12-600	1	7200	7200
7	Провод ПВС 2х6	10	96,9	969
8	Провод ПВЗ 16	2	111	222
За оборудование			Итого	34921
24/220 В (DC/AC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	Контроллер DELTA PWM 2410	1	915	915
3	Аккумуляторная батарея Delta GEL 12-55	2	8990	17980
4	Коннектор Delta MC4 AB	1	150	150
5	Инвертор ИС3-24-600	1	7500	7500
6	Провод ПВС 2х4	10	68,5	685
7	Провод ПВЗ 16	2	111	222
За оборудование			Итого	35632

По данным табл. 2 можно сделать вывод, что менее затратной также является схема 12/220 В. Основная доля затрат при реализации схемы автономного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/AC приходится на аккумуляторные батареи (до 50,5 %), далее следуют ФСМ (до 23,4 %) и инвертор (до 21,0 %).

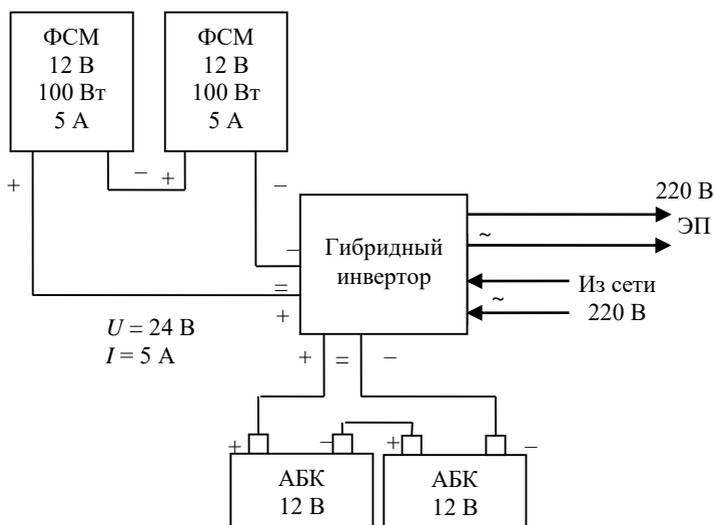
IV. Гибридная солнечная электростанция для питания нагрузки переменного тока

На рис. 3 приведены схемы реализации гибридной солнечной электростанции для питания нагрузки переменного тока напряжением 220 В (DC/AC).

В табл. 3 представлены затраты на приобретение оборудования для реализации схемы гибридной солнечной электростанции.



а.



б.

Рис. 3. Схема гибридного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/AC: 12/220 В (а); 24/220 В (б)
 АБК – аккумуляторная батарея; ФСМ – фотоэлектрический солнечный модуль;
 ЭП – электроприемник переменного тока

Таблица 3.
Сравнение затрат на реализацию схем гибридного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/AC

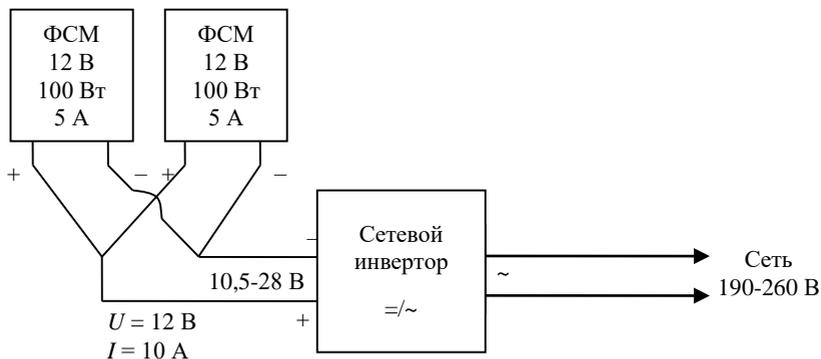
№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.	Цена за ед., руб.	Цена всего, руб.
12/220 В (DC/AC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	Коннектор DELTA MC4Y Cable	1	595	595
3	Коннектор Delta MC4 AB	1	150	150
4	Гибридный инвертор SILA V 1000P (1кВт, 12В, PWM 50А)	1	16000	16000
5	Аккумуляторная батарея Delta GEL 12-100	1	15990	15990
6	Провод ПВС 2х6	10	96,9	969
7	Провод ПВЗ 16	2	111	222
За оборудование			Итого	42106
24/220 В (DC/AC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	Коннектор Delta MC4 AB	1	150	150
3	Гибридный инвертор SILA V 2000P (2кВт, 24В, PWM 50А)	1	18600	18600
4	Аккумуляторная батарея Delta GEL 12-55	2	8990	17980
5	Провод ПВС 2х4	10	68,5	685
6	Провод ПВЗ 16	2	111	222
За оборудование			Итого	45817

На основе данных из табл. 3 можно сделать вывод: схема 12/220 В дешевле. Основная доля затрат при реализации схемы гибридного подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/AC приходится на гибридный инвертор (до 40,6 %), далее следуют аккумуляторные батареи (до 39,2 %) и ФСМ (до 19,4 %). Следует отметить также, что приведенные в табл. 3 гибридные инверторы позволяют увеличить мощности ФСМ до 1 кВт и 2 кВт соответственно.

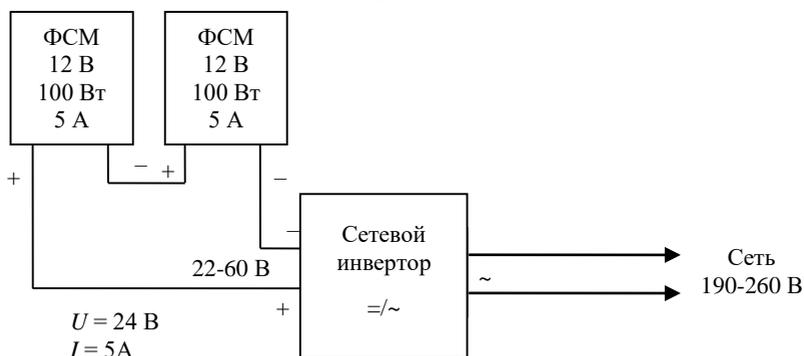
V. Сетевая солнечная электростанция для питания нагрузки переменного тока

На рис. 4 приведены схемы реализации сетевой солнечной электростанции для питания нагрузки переменного тока напряжением 220 В (DC/AC).

В табл. 4 представлены затраты на приобретение оборудования для реализации схемы сетевой солнечной электростанции.



а.



б.

Рис. 4. Схема сетевого подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/АС: 12/220 В (а); 24/220 В (б)
ФСМ - фотоэлектрический солнечный модуль

Таблица 4.

Сравнение затрат на реализацию схем сетевого подключения энергоустановки на основе ФСМ-12/24В DC/АС

№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.	Цена за ед., руб.	Цена всего, руб.
12/220 В (DC/AC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	КОННЕКТОР DELTA MC4Y CABLE	1	595	595

Продолжение табл. 4.

3	КОННЕКТОР DELTA MC4 AB	1	150	150
4	Grid tie inverter (600W, 10.5-28V, MPPT 45A)	1	4600	4600
5	Провод ПВС 2х6	10	96,9	969
За оборудование			Итого	14494
24/220 В (DC/AC)				
1	ФСМ Delta SM 100-12P	2	4090	8180
2	КОННЕКТОР DELTA MC4 AB	1	150	150
3	Grid tie inverter (600W, 22-60V, MPPT 45A)	1	4600	4600
4	Провод ПВС 2х4	10	68,5	685
За оборудование			Итого	13615

По данным табл. 4 видно, что в случае сетевого подключения наименьшие затраты на приобретение оборудования требует схема 24/220 В. Основная доля затрат приходится на ФСМ (до 60,1 %), далее следует сетевой инвертор (до 33,8 % затрат).

VI. Заключение

Схемы автономного и гибридного подключения энергоустановок на основе ФСМ обеспечивают потребителей электроэнергией в ночное время суток, но более чем в два раза превышают по стоимости сетевые солнечные электростанции.

С точки зрения технико-экономического обоснования, наиболее эффективными из рассмотренных схем подключения энергоустановок на основе ФСМ являются схемы сетевого подключения. Они позволяют сократить потребление электрической энергии в дневное время суток из централизованной электросети.

Для более эффективного использования подобных систем, в том числе, на объектах сельской местности, необходимо развитие законодательной и нормативно-правовой базы в области нетрадиционных источников энергии на территории Российской Федерации [10].

© Терентьев П.В., 2019

© Филатов Д.А., 2019

© Захаров А.Ю., 2019

© Симонов А.С., 2019

Библиографический список

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 02.02.2015 г. № 151-р (ред. от 13.01.2017 г.) «Об утверждении Стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года».
- [2] Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
- [3] Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 17.02.2010 г. № 61 «Об утверждении примерного перечня мероприятий в области энергоснабжения и повышения энергетической эффективности, который может быть использован в целях разработки региональных, муниципальных программ в области энергоснабжения и повышения энергетической эффективности».
- [4] ГОСТ 32144-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [5] Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 224 с.
- [6] Терентьев П.В. Исследование качества и повышение эффективности использования электроэнергии в электротехнических комплексах служебных и жилых зданий: дисс. канд. техн. наук, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, 2014. – 285 с.
- [7] Филатов Д.А., Терентьев П.В. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетике сельского хозяйства. Н. Новгород: Нижегородская ГСХА, 2017. – 116 с.
- [8] Филатов Д.А. Применение возобновляемых источников энергии для повышения эффективности электроснабжения сельскохозяйственных предприятий: дисс. канд. техн. наук, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, 2016. – 154 с.
- [9] Онлайн Трейд. [Электронный ресурс]. URL: https://www.onlinetrade.ru/catalogue/zashchita_pitaniya-c2533/ (дата обращения 01.11.2019).
- [10] Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. – 264 с.

**P.V. Terentyev, D.A. Filatov,
A.Yu. Zakharov, A.S. Simonov**

**CONSIDERATION OF VARIOUS SCHEMES
FOR CONNECTING POWER PLANTS
BASED ON PHOTOELECTRIC SOLAR MODULES
TO ENHANCE ENERGY EFFICIENCY
OF ELECTRICAL COMPLEXES IN RURAL AREAS**

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Both in the world and in Russia, prices for electricity from a centralized power supply system are rising. For this reason, industrialized countries are intensively developing alternative energy systems, which are based on renewable energy sources. The use of unconventional energy sources in the form of photovoltaic solar modules will improve the energy efficiency of electrical complexes of various rural facilities and reduce the load on a centralized power grid. The article discusses the connection schemes of power plants based on photovoltaic solar modules, from the point of view of a feasibility study of the effectiveness of their implementation.

Keywords: electrical complexes, energy efficiency, photovoltaic solar modules, unconventional energy sources, wiring diagrams.

References

- [1] Order of the Government of the Russian Federation No. 151 dated February 02, 2015 (as amended on January 13, 2017), «Ob utverzhdenii Strategii ustoychivogo razvitiya sel'skikh territoriy Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda (On approval of the Strategy for the sustainable development of rural territories of the Russian Federation for the period until 2030)» (in Russian).
- [2] Federal Law No. 261-FZ dated November 23, 2009, «Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy ef-fektivnosti i o vnesenii izmeneniy v ot-del'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii (On energy saving and on improving energy efficiency and on amending certain legislative acts of the Russian Federation)» (in Russian).
- [3] Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation No. 61 dated February 17, 2010, «Ob utverzhdenii primernogo perechnya meropriyatiy v oblasti energosnabzheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti, kotoryy mozhet byt' ispol'zovan v tselyakh razrabotki regional'nykh, munitsipal'nykh programm v oblasti energosnabzheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti (On approval of the approximate list of measures in the field of energy supply and energy efficiency, which can be used to develop regional and municipal programs in the field of energy supply and energy efficiency)» (in Russian).

- [4] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [5] G.Ya. Vagin, A.B. Loskutov and A.A. Sevostyanov, *Elektromagnitnaya sovmeštmost' v elektroenergetike (Electromagnetic compatibility in the power industry)*. N. Novgorod: Akademiya, 2010 (in Russian).
- [6] P.V. Terentiev, «*Issledovanie kachestva i povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii v elektrotekhnicheskikh kompleksah sluzhebnyh i zhilyh zdaniy (Study of the quality and increase of the efficiency of using electric power in electrical engineering complexes of office and residential buildings)*», Cand. of Tech. S. thesis, NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia, 2014, P. 285 (in Russian).
- [7] D.A. Filatov and P.V. Terentyev, *Kachestvo elektroenergii i elektromagnitnaya sovmeštmost' v elektroenergetike sel'skogo khozyaystva (The quality of electricity and electromagnetic compatibility in the electricity industry of agriculture)*. N. Novgorod: NNSAA, 2017 (in Russian).
- [8] D.A. Filatov, «*Primeneniye vozobnovlyayemykh istochnikov energii dlya povysheniya effektivnosti elektroobzheniya sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy (The use of renewable energy sources to improve the efficiency of electricity supply to agricultural enterprises)*», Cand. of Tech. S. thesis, NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia, 2016, P. 154 (in Russian).
- [9] Online Trade. [Online]. Available at: https://www.onlinetrade.ru/catalogue/zashchita_pitanija-c2533/ [Accessed: Nov. 1, 2019].
- [10] P.P. Bezrukikh and D.S. Strebkov, *Vozobnovlyayemaya energetika: strategiya, resursy, tekhnologii (Renewable Energy: Strategy, Resources, Technologies)*. Moscow: GNU VIESKH, 2005 (in Russian).

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.314

Д.А. Алешин, Н.Н. Вихорев

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ БЕЗМОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Выпрямители – устройства для преобразования переменного сетевого напряжения в постоянное. В офисной технике, маломощных гальванических установках и зарядных устройствах аккумуляторных батарей используются мостовые выпрямители с емкостным фильтром, т.е., простейшая схемотехническая реализация однофазного выпрямителя. Главный недостаток данного преобразователя – потребление импульсного тока, которое приводит к генерации высших гармонических составляющих. Для решения проблемы применяются корректоры коэффициента мощности (ККМ), формирующие активный синусоидальный ток потребления за счет использования дроссели и транзисторного преобразователя. Однако из-за использования входного диодного моста в большинстве ККМ не выполняется условие наличия общей нейтрали сети и нагрузки. Поэтому появился отдельный тип устройств, названный безмостовыми выпрямителями, у которого отсутствует входной диодный мост. На основе анализа безмостовых выпрямителей были выделены их преимущества и недостатки, а также предложено новое схемотехническое решение, получившее название двухканальный безмостовой выпрямитель.

Ключевые слова: безмостовые выпрямители, инвертирующий преобразователь, корректоры коэффициента мощности, однофазные выпрямители, синусоидальный потребляемый ток.

1. Введение

В силу ограничений однофазных мостовых выпрямителей был выделен отдельный класс устройств, обозначенный как корректоры коэффициента мощности, в рамках которых, в свою очередь, обозначен подкласс безмостовых выпрямителей. Данные преобразователи позволяют сформировать синусоидальный потребляемый ток и имеют общую нейтраль сети и нагрузки, которая требуется в ряде устройств, например, выпрямители двигателей постоянного тока и аккумуляторных батарей с напряжением

свыше 100 В. Условие общей нейтрали важно с точки зрения электробезопасности, поскольку даже при небольшом выходном напряжении, человек, работающий с данным электрооборудованием, может оказаться под ненулевым потенциалом, что приводит к травмам или летальному исходу.

Одним из схемотехнических решений безмостового выпрямителя является преобразователь, представленный на рис. 1 и позволяющий связать общий провод сети и общий провод нагрузки [1-3]. Помимо основных преимуществ, устройство обеспечивает переключение при нулевом токе и нулевом напряжении, что позволяет минимизировать динамические потери, но из-за использования резонансного контура, образованного элементами $C1$ и $L2$, увеличиваются активные потери, у устройства отсутствует диодный мост, что позволяет немного уменьшить активные потери и снизить количество полупроводниковых элементов.

К недостаткам данного преобразователя можно отнести ограниченность его использование только на большой частоте и требование использование ШИМ совместно с ЧИМ, что усложняет систему управления [4]. Недостатком также является использование обратных диодов, интегрированных в корпус транзистора, различие алгоритмов работы и реактивных цепей по которым протекает ток при отрицательном и положительном полупериодах питающей сети.

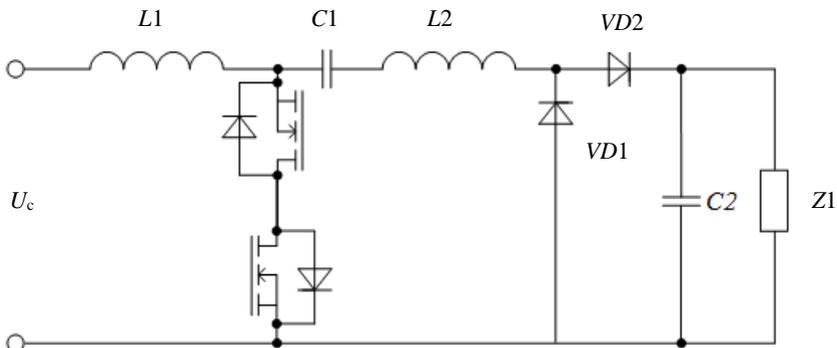


Рис. 1. Безмостовое устройство, формирующее синусоидальный активный ток потребления

Другой схемотехнической реализацией безмостового устройства, формирующего синусоидальный активный ток потребления, является преобразователь «Однофазный безмостовой корректор коэффициента мощности» [5]. Он представлен на рис. 2. Представленная схема позволяет получить на выходе любой уровень напряжения (от нуля до бесконечности),

содержит инвертирующий и повышающе-понижающий преобразователи с общим накопительным дросселем и выходным емкостным фильтром.

Принцип работы устройства заключается в следующем. На положительном полупериоде при одновременно открытых транзисторах $VT1$ и $VT2$ энергия запасается в индуктивном накопителе $L1$. Ток протекает по контуру от фазы сети к нейтрали по следующему контура: фаза сети – диод $VD1$ – транзистор $VT1$ – индуктивный накопитель $L1$ – транзистор $VT2$ – диод $VD4$ – нейтраль сети. При выключении транзисторов $VT1$ и $VT2$ накопленная энергия передается в нагрузку по цепи: нейтраль сети – диод $VD3$ – индуктивный накопитель $L1$ – диод $VD5$ – конденсатор фильтра $C1$. На отрицательном полупериоде накопление энергии в индуктивности $L1$ происходит при отпирации транзистора $VT2$. Ток протекает по контуру: нейтраль сети – диод $VD5$ – индуктивный накопитель $L1$ – транзистор $VT2$ – диод $VD2$ – фаза сети. При размыкании транзистора $VT2$ энергия передается в нагрузку по цепи: нейтраль сети – диод $VD3$ – индуктивный накопитель $L1$ – диод $VD5$ – конденсатор фильтра $C1$.

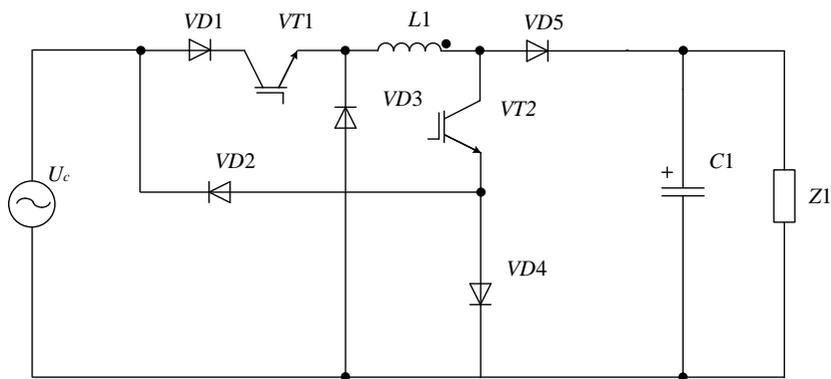


Рис. 2. Однофазный безмостовой корректор коэффициента мощности

В данной схеме сохраняется общая нейтраль сети и нагрузки. К достоинствам схемы можно отнести отсутствие резонансных контуров, алгоритм управления в отрицательный и положительный полупериоды одинаковый, использование общего индуктивного накопителя. К недостаткам схемы относится большое количество последовательно соединенных полупроводниковых элементов, что увеличивает статические и динамические потери в преобразователе.

Схема сетевого выпрямителя с корректором коэффициента мощности представлена на рис. 3 [6]. Данная схема содержит полумостовой инвертор напряжения, индуктивные накопители и цепи коммутации. Преоб-

разователь позволяет формировать синусоидальный активный ток потребления, получая на выходе двухполярное выпрямленное напряжение.

Принцип работы сетевого выпрямителя с корректором коэффициента мощности аналогичен активному выпрямителю на базе полумостового инвертора напряжения. Поскольку в сетевом выпрямителе с корректором коэффициента мощности на выходе установлены две емкости с общей точкой, связанной с нейтралью сети, схема упрощается из-за отсутствия обратных диодов. В то же время из-за добавления коммутационных элементов происходит усложнение.

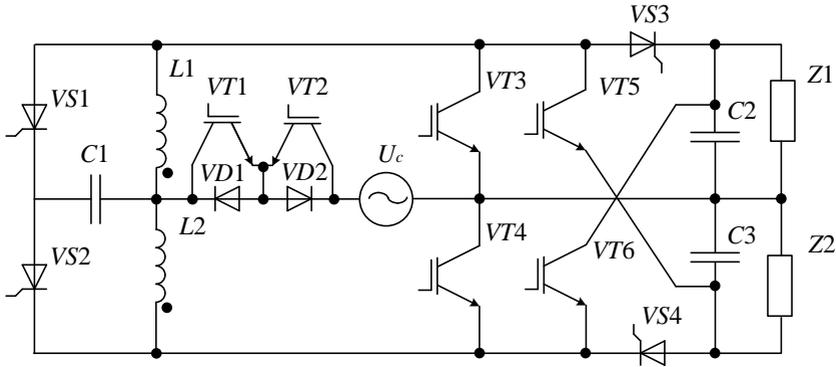


Рис. 3. Сетевой выпрямитель с корректором коэффициента мощности

К недостаткам схемы можно отнести излишнее количество полупроводниковых элементов; также данная схема при работе на однополярную нагрузку не имеет общую нейтраль.

II. Предложенные схемотехнические решения

Другим вариантом безмостового выпрямителя является схема безмостового устройства, формирующего синусоидальный активный ток потребления, на базе понижающего и инвертирующего преобразователей. Она представлена на рис. 4.

Преобразователь содержит 2 транзистора ($VT1$, $VT2$), 2 диода ($VD1$, $VD2$), 2 катушки индуктивности ($L1$, $L2$), емкостной фильтр ($C1$) и нагрузку ($Z1$). В состав схемы входят понижающий и инвертирующий преобразователи с общим выходным фильтром. Понижающий сформирован транзистором $VT1$, дросселем $L1$, диодом $VD1$, и работает в положительный полупериод питающей сети. Инвертирующий преобразователь сформирован транзистором $VT2$, дросселем $L2$, диодом $VD2$, и работает в отрицательный полупериод питающей сети. Оба преобразователя работают на общую нагрузку $Z1$ и емкостной фильтр $C1$. Входное напряжение сети обозначено буквой U_c .

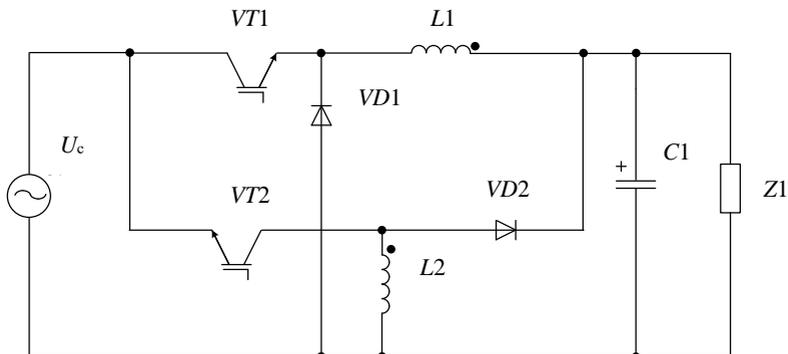


Рис. 4. Безмостовое устройство, формирующее синусоидальный активный ток потребления, на базе понижающего и инвертирующего преобразователей

При соответствующих алгоритмах управления преобразователь будет потреблять из сети активный синусоидальный ток и формировать на выходе постоянное напряжение, однако значения выходных напряжений находятся в диапазоне от нуля до среднего значения напряжения сети. Данное ограничение связано с тем, что используется понижающий преобразователь. Поскольку коэффициенты передачи преобразования по напряжению в различные полупериоды отличаются, отличаться будут и алгоритмы, что в свою очередь усложнит систему управления.

Схема безмостового устройства, формирующего синусоидальный активный ток потребления, на базе повышающего и инвертирующего преобразователей представлена на рис. 5. Преобразователь содержит 2 транзистора ($VT1$, $VT2$), 2 диода ($VD1$, $VD2$), 2 катушки индуктивности ($L1$, $L2$), емкостной фильтр ($C1$) и нагрузку ($Z1$). В состав схемы входят повышающий и инвертирующий преобразователи с общим выходным фильтром. Повышающий преобразователь сформирован транзистором $VT1$, дросселем $L1$, диодом $VD1$, и работает в положительный полупериод питающей сети. Инвертирующий преобразователь сформирован транзистором $VT2$, дросселем $L2$, диодом $VD2$, и работает в отрицательный полупериод питающей сети. Оба преобразователя работают на общую нагрузку $Z1$ и емкостной фильтр $C1$. Входное напряжение сети обозначено буквой U_c .

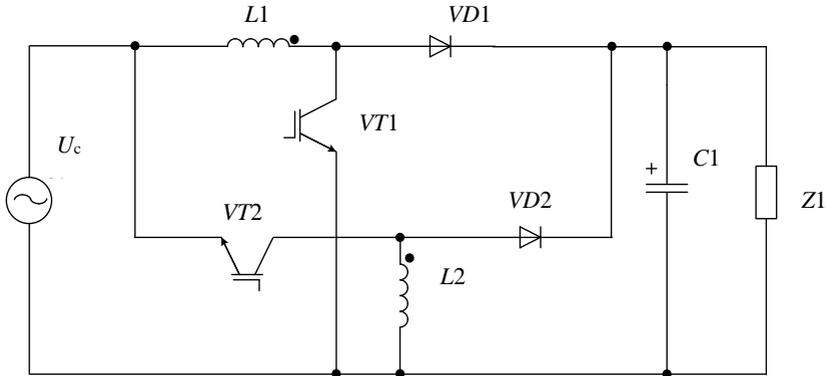


Рис. 5. Безмостовое устройство, формирующее синусоидальный активный ток потребления, на базе повышающего и инвертирующего преобразователей

При соответствующих алгоритмах управления преобразователь будет потреблять из сети активный синусоидальный ток и формировать на выходе постоянное напряжение. Значения выходных напряжений преобразователя находятся в диапазоне от нуля до бесконечности, однако, из-за использования повышающего преобразователя, минимальные пульсации выходного напряжения при выходном напряжении будут в диапазоне от среднего значения напряжения питания до бесконечности. Поскольку коэффициенты передачи преобразования по напряжению в различные полупериоды отличаются, отличаться будут и алгоритмы, что усложнит систему управления.

Последним рассмотренным вариантом безмостового выпрямителя является схема безмостового устройства, формирующего синусоидальный активный ток потребления, на базе двух инвертирующих преобразователей. Она представлена на рис. 6 [7]. Предложенная схема содержит 3 транзистора ($VT1$, $VT2$, $VT3$), 3 диода ($VD1$, $VD2$, $VD3$), 2 катушки индуктивности ($L1$, $L2$), емкостной фильтр ($C1$) и нагрузку. В состав схемы входят два инвертирующих преобразователя с общим выходным фильтром. Первый сформирован транзисторами $VT1$ и $VT3$, дросселем $L1$, диодами $VD1$ и $VD2$, и работает в положительный полупериод питающей сети. Второй сформирован транзистором $VT2$, дросселем $L2$, диодом $VD3$, и работает в отрицательный полупериод питающей сети. Оба преобразователя работают на общие нагрузку $Z1$ и емкостной фильтр $C1$. Входное напряжение сети обозначено буквой U_c .

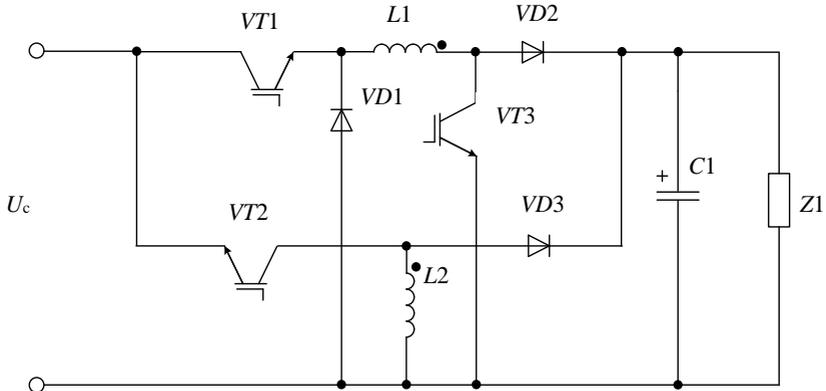


Рис. 6. Безмостовое устройство, формирующее синусоидальный активный ток потребления, на базе двух инвертирующих преобразователей

Значения выходных напряжений преобразователя находятся в диапазоне от нуля до бесконечности. Алгоритмы в различные полупериоды одинаковы, поскольку используется одинаковый тип преобразователей. К недостаткам, по сравнению с предыдущими схемами, можно отнести большее количество полупроводниковых элементов. Тем не менее, данная схема имеет больше преимуществ, чем недостатков. Предложенная схема получила название двухканальной безмостовой выпрямитель.

Были выделены основные критерии оценки безмостовых выпрямителей: общая нейтраль сети и нагрузки; минимизация активных потерь; потребление синусоидального тока; минимизация динамических потерь; простота алгоритмов управления; минимизация количества одновременно работающих полупроводниковых приборов. В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа безмостовых выпрямителей. Цифрами от 1 до 6 обозначены схемы, представленные на рис. 1-6.

Таблица 1.
Сравнительный анализ безмостовых выпрямителей

Критерии	Схема	1	2	3	4	5	6
Общая нейтраль		+	+	+	+	+	+
Минимизация активных потерь		-	+	-	+	+	+
Потребление синусоидального тока		+	+	+	+	+	+
Минимизация динамических потерь		+	-	-	-	-	-
Простота алгоритмов управления		-	+	-	-	-	+
Минимизация количества одновременно работающих полупроводниковых приборов		-	-	+	+	+	+

III. Заключение

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что максимальное количество преимуществ имеет схема двухканального безмостового выпрямителя. Единственным недостатком является отсутствие минимизации динамических потерь, однако данная проблема может быть решена при помощи добавления реактивных элементов для режима мягкого переключения.

© Алешин Д.А., 2019

© Вихорев Н.Н., 2019

Библиографический список

- [1] Кук С. Безмостовой преобразователь корректора коэффициента мощности с КПД до 98 % и КМ 0,999 // Электронные компоненты. 2010. № 8. С. 45-50.
- [2] Кук С. Безмостовой ККМ-преобразователь с КПД выше 98% и коэффициентом мощности 0,999. Часть 2 // Электронные компоненты. 2010. № 11. С. 46-52.
- [3] Кук С. Безмостовой ККМ-преобразователь с КПД выше 98% и коэффициентом мощности 0,999. Часть 3 // Электронные компоненты. 2011. № 2. С. 48-57.
- [4] Fardoun A.A., Ismail E.H., Al-Saffar M.A., Sabzali A.J. A bridgeless resonant pseudoboost PFC rectifier // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. № 29 (11). P. 5949-5960.
- [5] Дроздецкий С.В., Кругликов И.А., Ширяев А.О., Якименко И.В. Однофазный безмостовой корректор коэффициента мощности, Пат. 2541910 РФ, заявл. 30.12.13; опубл. 20.02.15. – Бюл. №5.
- [6] Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А., Смирнов В.Н. Сетевой выпрямитель с корректором коэффициента мощности, Пат. 143860 РФ, заявл. 20.03.14; опубл. 10.08.14. – Бюл. №22.
- [7] Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Алешин Д.А. Безмостовой корректор коэффициента мощности, Пат. 189902 РФ, заявл. 14.03.19; опубл. 11.06.19. – Бюл. №17.

D.A. Aleshin, N.N. Vikhorev

TWO-CHANNEL BRIDGELESS RECTIFIER

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Devices called rectifiers are used to convert alternating voltage to direct voltage. The simplest circuit design of a single-phase rectifier is a bridge with a capacitive filter. These devices are widely used in office devices, low-power galvanic installations and battery chargers. The main disadvantage of this converter is the consumption of pulsed current, which leads to the generation of higher harmonic components. To

solve this problem, power factor correctors (PFC) are used, which form an active sinusoidal current consumption through the use with chokes and a transistor converter. However, due to the use of an input diode bridge in most PFC, the condition for the presence of a common network and load neutral is not fulfilled. Therefore, a separate type of device appeared, called bridgeless rectifiers, which does not have an input diode bridge. Based on the analysis of bridgeless rectifiers, their advantages and disadvantages have been highlighted, as well as a new circuit solution, called a two-channel bridgeless rectifier, has been proposed.

Keywords: active sinusoidal current, bridgeless rectifiers, inverting converter, power factor correctors, single-phase rectifiers.

References

- [1] S. Cuk, «Bezmostovoj preobrazovatel' korrektora koefitsiyenta moshchnosti s KPD do 98% i KM 0,999 (Bridgeless power factor corrector converter with efficiency up to 98% and CP 0,999)», *Electronic components*, vol. 8, pp. 45-50, 2010 (in Russian).
 - [2] S. Cuk, «Bezmostovoj KKM-preobrazovatel' s KPD vyshe 98% i koefitsiyentom moshchnosti 0,999. Chast' 2 (Bridgeless power factor corrector converter with efficiency above 98% and power factor 0,999. Part 2)», *Electronic components*, vol. 11, pp. 46-52, 2010 (in Russian).
 - [3] S. Cuk, «Bezmostovoj KKM-preobrazovatel' s KPD vyshe 98% i koefitsiyentom moshchnosti 0,999. Chast' 3 (Bridgeless power factor corrector converter with efficiency above 98% and power factor 0,999. Part 3)», *Electronic components*, vol. 2, pp. 48-57, 2011 (in Russian).
 - [4] A.A. Fardoun, E.H. Ismail, M.A. Al-Saffar and A.J. Sabzali, «A bridgeless resonant pseudoboost PFC rectifier», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29 (11), pp. 5949-5960, Nov. 2014.
 - [5] S.V. Drozdetsky, I.A. Kruglikov, A.O. Shiryayev and I.V. Yakimenko, «Odnofaznyj bezmostovoj korrektor koefitsiyenta moshchnosti (A single phase bridgeless power factor corrector)», R.F. Patent 2541910, Feb. 20, 2015 (in Russian).
 - [6] S.B. Reznikov, V.V. Bocharov, I.A. Kharchenko and V.N. Smirnov, «Setevoy vypryami-tel' s korrektorom koefitsiyenta moshchnosti (Mains rectifier with power factor corrector)», R.F. Patent 143860, Aug. 10, 2014 (in Russian).
- A.I. Chivenkov, N.N. Vikhorev and D.A. Aleshin, «Bezmostovoj korrektor koefitsiyenta moshchnosti (A bridgeless power factor corrector)», R.F. Patent 189902, Jun. 11, 2019 (in Russian).

УДК.621.752.3

Б.А. Гордеев ^{1,2}, С.Н. Охулков ^{1,2},
А.А. Кралин ², А.И. Ермолаев ^{1,2}

ИЗМЕРЕНИЕ ПИКОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОБМОТОК МАГНИТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ КАЧАЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ

¹Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН»

²Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Применен новый подход в построении измерительных выходных схем бесконтактных магнитоупругих преобразователей (БМП), основанный на новых технических решениях и реализованный при помощи измерителя фазовых сдвигов и измерителя пиковых значений напряжений с широкополосной частотной модуляцией (ЧМ) генераторов качающейся частоты (ГКЧ) на нулевой промежуточной частоте. Особенность метода состоит в том, что на основании сигналов измерительных обмоток (ИО) БМП в ГКЧ формируются опорные высокочастотные сигналы с частотами, пропорциональными измеренным напряжениям. Эти опорные сигналы сравниваются со смещенными, полученными посредством задержки опорного сигнала, в блоке-смесителе, выделяющего разностную частоту – низкочастотный сигнал биений. Показано, что разность частот биений пропорциональна разности напряжений измерительных обмоток БМП, следовательно, измерительные схемы на основе ГКЧ могут быть использованы при оценке углов закрутки валов. Более того, в такой измерительной схеме нет снижения точности из-за высокочастотных помех, фазового сдвига напряжений на ИО, несимметрии магнитной цепи, колебаний питающего напряжения.

Ключевые слова: бесконтактный магнитоупругий преобразователь, генератор качающейся частоты, датчик момента, деформация кручения вала, измерительные выходные схемы, упругий вал, частота биений, частотная модуляция.

I. Магнитоупругие бесконтактные датчики крутящего момента

Для технологического контроля и автоматизации многих рабочих машин требуется измерять крутящие моменты на вращающихся валах. Решение этой задачи усложняется необходимостью передачи результата измерения с подвижного вала в неподвижное измерительное устройство.

Из большого числа различных средств измерения крутящего момента [1-3] наиболее просто решают указанные задачи бесконтактные магнитоупругие преобразователи (БМП) крутящего момента (рис. 1), включающие в себя первичный бесконтактный магнитоупругий преобразователь и выходную схему.

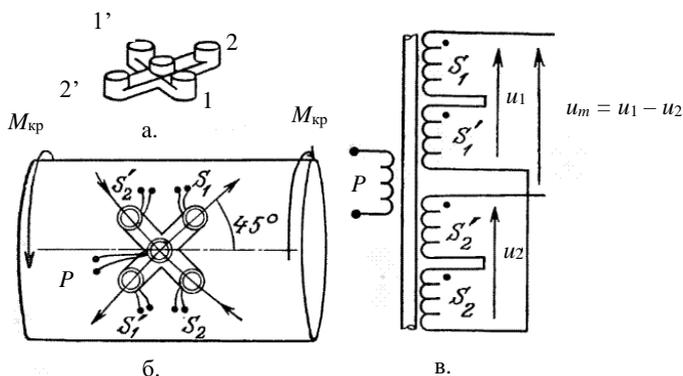


Рис. 1. Магнитоупругий бесконтактный датчик крутящего момента: форма стержней магнитопровода обмоток (а); силовая схема (б); электрическая схема (в)

Действие БМП основано на магнитоупругом эффекте, проявляющемся в изменении магнитной проницаемости чувствительного ферромагнитного элемента под воздействием механических напряжений. В большинстве конструкций БМП чувствительным элементом (ЧЭ) служит участок контролируемого вала, механические напряжения в котором возникают при приложении к валу крутящего момента [4-7].

Для того, чтобы воспринять изменения магнитной проницаемости материала вала, в нем с помощью возбуждающего электромагнита создается переменное электромагнитное поле. При изменении магнитной проницаемости вала электромагнитное поле в нем деформируется: изменяются ЭДС, индуцируемые в катушках измерительных электромагнитов БМП. Разность этих ЭДС пропорциональна величине приложенного момента. Возбуждающий (ВЭ) и измерительные электромагниты (ИЭ) устанавливаются неподвижно относительно вращающегося вала (рис. 1) [1-3,8].

Всякое усилие, приложенное к ферромагнитному материалу, вызывает изменение его магнитной проницаемости μ , которая растет в областях растяжения материала и убывает в областях сжатия. Если на ферромагнитный цилиндрический вал действует момент, ось которого совпадает с осью вала, то возникающие напряжения определяют на его поверхности два взаимно перпендикулярных направления под углом $\pm 45^\circ$ к оси вала, вдоль

которых изменение магнитных проницаемостей μ_1 и μ_2 максимально и противоположно по знаку (рис. 1).

Для выявления этих изменений используется стержневой магнитопровод крестообразной формы (рис. 1, а), несущий первичную обмотку P и две пары соединенных последовательно вторичных обмоток S_1 и S'_1 , S_2 и S'_2 (рис. 1, б). Это обеспечивает взаимодействие между первичной и вторичными обмотками. Если момент на валу отсутствует, то магнитные проницаемости ферромагнитного вала $\mu_1 = \mu_2$, и напряжения измерительных обмоток электромагнитов БМП $u_1 = u_2$, $u_m = 0$. В примере, приведенном на (рис. 1), магнитные проницаемости ферромагнитного вала $\mu_1 > \mu_2$, и напряжения измерительных обмоток электромагнитов БМП $u_1 > u_2$, $u_m > 0$.

По расположению полюсов ИЭ относительно соседних полюсов ВЭ преобразователя подразделяются на симметричные и несимметричные. По числу полюсов ВЭ преобразователи разделяются на двухполюсные – крестовые или перекрестные и многополюсные – кольцевые [2,3,9-15].

II. Выходные схемы магнитоупругих датчиков крутящего момента

Любому крутящему моменту M , приложенному к контролируемому валу, соответствует механическое напряжение σ на поверхности ЧЭ – вала [3,8]. Поэтому, для каждого значения σ ЭДС катушки ИЭ определяется через соответствующую величину магнитного потока $\Phi_{\text{и}}$ по известному соотношению:

$$E_{\text{и}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{в}} \cdot \Phi_{\text{и}} \cdot N_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $2 \cdot \pi \cdot f_{\text{в}} = \omega_{\text{в}}$ – угловая частота переменного электромагнитного поля в ЧЭ; $N_{\text{и}}$ – число витков катушки ИЭ.

Магнитный поток, проходящий через полюс ВЭ при частоте возбуждения $f_{\text{в}}$, числе витков катушки ВЭ и напряжении на катушке $U_{\text{к}}$, обусловлено напряжением питания $U_{\text{в}}$ и схемой соединения катушек, определяется как:

$$\Phi_{\text{и}} \approx \frac{U_{\text{к}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{в}} \cdot N_{\text{в}}}. \quad (2)$$

Магнитный поток, проходящий через полюс ИЭ много меньше магнитного потока в зазоре, т.е., $\Phi_{\text{и}} \ll \Phi_{\text{з}}$. Магнитный поток $\Phi_{\text{з}}$ в зазоре однозначно связан с потоком в вале $\Phi_{\text{в}} = k_N \cdot \Phi_{\text{в}}$. Значения коэффициента k_N принимаются: в кольцевом БМП $k_N = 2$, в крестовом $k_N = 1$. Магнитный поток в полюсе ВЭ:

$$\dot{\Phi}_n = \dot{\Phi}_z + k_N \cdot \dot{\Phi}_p, \quad (3)$$

где Φ_p – поток рассеяния, который не проходит в поверхность ЧЭ – вала.

При приложении к контролируемому валу крутящего момента M величина магнитного потока Φ_n изменяется обратно пропорционально магнитному сопротивлению зазора между поверхностью ЧЭ – вала и полюсом ИЭ и магнитному сопротивлению полюса ИЭ [2,3].

Особенностью БМП крутящего момента является получение информации в виде переменного напряжения, которое используется далее в выходных схемах, реализующих его выпрямление, фильтрацию и усиление. Получение информации в виде переменного напряжения в выходных схемах БМП влечет за собой ряд недостатков. При изменении крутящего момента в БМП происходит изменение фазы выходных напряжений измерительных электромагнитов $U_{\text{вых}}$, что вызвано изменением магнитных потоков (рис. 2).

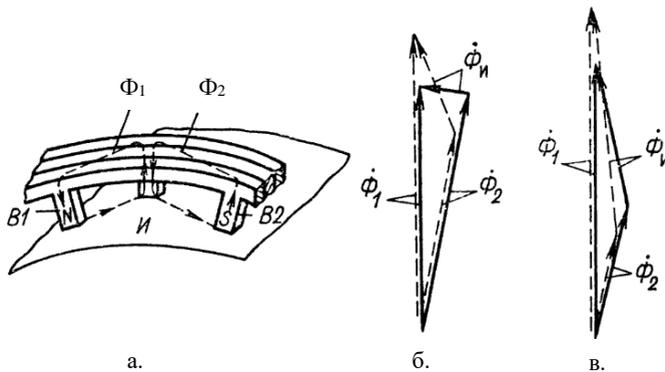


Рис. 2. Магнитные потоки через измерительный полюс магнитоупругого преобразователя: внешний вид БМП (а); векторная диаграмма для симметричного БМП (б); для несимметричного БМП (в)

Поток Φ_n через измерительный полюс И равен разности потоков Φ_1 и Φ_2 , создаваемых порознь полюсами возбуждения В1 и В2 кольцевого преобразователя (рис. 2, а). При несимметрии магнитной цепи преобразователя потоки Φ_1 и Φ_2 отличаются не только по величине, но и по фазе (рис. 2, б). При наличии момента на валу происходит изменение указанных потоков, например, Φ_1 увеличивается, а Φ_2 уменьшается, при этом, как видно из (рис. 2, б), изменяется не только амплитуда, но и фаза результирующего потока Φ_n [2,3].

В выходных схемах БМП на выпрямительных диодных мостах переменного тока частотой 50 Гц сравниваются выпрямленные напряжения измерительных обмоток $U_{и1}$ и $U_{и2}$ кольцевого БМП (рис. 3) [2,3].

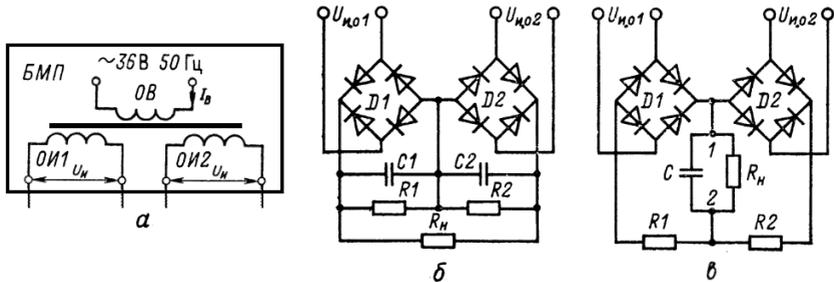


Рис. 3. Измерительные схемы:
электрическая схема обмоток возбуждающих и измерительных электромагнитов БМП (а); электрическая схема сравнения напряжений (б); электрическая схема сравнения токов (в)

В первом случае (рис. 3, б) напряжения измерительных обмоток выпрямляются диодными мостами $D1$ и $D2$, сглаживаются емкостным фильтром $C1$, $C2$ и подаются на балластные резисторы $R1$, $R2$. Нагрузка R_n включается на разность выпрямленных напряжений.

Во втором случае при приложении к валу момента потенциалы точек 1 и 2 (рис. 3, в) изменяются, и, следовательно, изменяется и напряжение на нагрузке R_n . Пульсации выходного напряжения сглаживаются емкостным фильтром. Нуль выходного напряжения при $M = 0$ устанавливается подбором сопротивлений резисторов $R1$, $R2$, а амплитуда – выбором R_n .

При отсутствии момента нагрузки среднее значение выходных напряжений $U_{вых} = U_{и1} - U_{и2}$ равно нулю (рис. 4, а). При приложении момента появляется пропорциональная ему постоянная составляющая напряжения $U_{вых}$ (рис. 4, б).

Сдвиг по фазе между $U_{и1}$ и $U_{и2}$ приводит к появлению пульсаций выходного сигнала, величина которых остается постоянной при изменении момента на валу. При приложении крутящего момента $U_{и1}$ и $U_{и2}$ изменяются по амплитуде лишь на несколько процентов, поэтому величина указанных пульсаций по амплитуде может в несколько раз превышать величину полезного сигнала (постоянную составляющую $U_{вых}$).

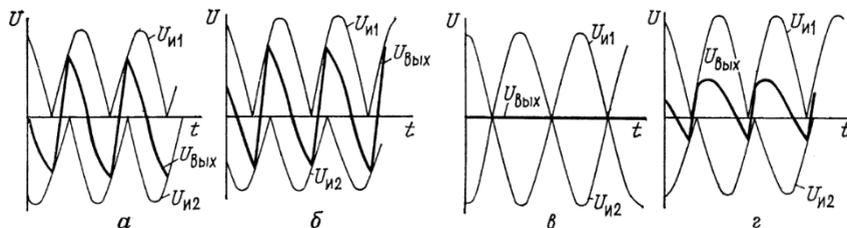


Рис. 4. Сравнение напряжений измерительных обмоток кольцевого БМП: при отсутствии момента и с фазовым сдвигом УИП (а); при приложении момента и с фазовым сдвигом УИП (б); при отсутствии момента и без фазового сдвига УИП (в); при приложении момента и без фазового сдвига УИП (г)

При отсутствии сдвига по фазе и $M = 0$ пульсации $U_{\text{вых}}$ отсутствуют (рис. 4, в). Приложение к валу момента вызывает появление пульсаций выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ ИО кольцевого БМП на частоте $2 \cdot \omega_{\text{в}}$ (рис. 4, г). Таким образом, одним из эффективных методов снижения пульсаций выходного напряжения ИЭ является устранение сдвига по фазе между напряжениями $U_{\text{и1}}$ и $U_{\text{и2}}$. Так как ток при разной полярности $U_{\text{и}}$ проходит через разные диоды выпрямительного моста, то из-за разброса характеристик диодов возможно неравенство амплитуд полувольт выпрямленного напряжения [2,3]. Это обстоятельство приводит к модуляции указанных выше пульсаций $U_{\text{вых}}$ даже при отсутствии первоначального сдвига по фазе между $U_{\text{и1}}$ и $U_{\text{и2}}$. Поэтому при реализации выходных схем датчиков БМП необходимо добиваться равенства амплитуд полувольт выпрямленных напряжений каждой измерительной обмотки.

В большинстве случаев БМП питаются напряжением с частотой 50 Гц [2,3]. При двухполупериодном выпрямлении возникает задача фильтрации пульсаций с четными гармониками ($2 \cdot \omega_{\text{в}}$, $4 \cdot \omega_{\text{в}}$ и т. д.). Обеспечить указанный частотный диапазон можно с помощью двух избирательных фильтров, пропускающих частоты $\omega_{\text{в}}$ двух ИО, и фильтра, ослабляющего все остальные высокочастотные помехи [3].

К прочим недостаткам классических БМП относятся: необходимость применения фазовращателя для устранения начального сдвига по фазе между напряжениями ИО БМП [2,3] и возрастание погрешности от колебания питающего напряжения [2,3,8,12].

Указанные недостатки выходных схем БМП не обеспечивают необходимой точности и разрешающей способности при измерении крутящих моментов на вращающихся валах промышленных установок и машин. Поэтому повышающиеся требования, предъявляемые к БМП, диктуют применение при их создании новейших методов анализа и синтеза, а также более совершенных конструкций измерительных систем.

Устранить указанные недостатки, присущие выходным схемам БМП, можно посредством компенсации фазовых сдвигов и пульсаций напряжений, регистрация которых осуществляется следующими методами [4-7]:

- 1) измерение фазовых сдвигов за один период исследуемого напряжения с помощью широкополосной частотной модуляции (ЧМ) генераторов качающейся частоты (ГКЧ), основанной на сравнении опорной частоты и смещенной частоты волн ГКЧ в смесителе, выделяющего нулевую разностную частоту $F_{60}(t)$ [4-7];
- 2) измерение пиковых значений переменных напряжений ИО БМП за один период исследуемого напряжения с помощью широкополосной частотной модуляции генераторов качающейся частоты, основанной на сравнении опорных частот и смещенных частот волн ГКЧ в смесителях, выделяющих нулевые разностные частоты $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, и с последующим вычислением их разности $F_{60}(t)$, пропорциональной результирующей ЭДС измерительной катушки $F_i(t)$ БМП [7].

III. Измерение пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП с помощью широкополосной частотной модуляции ГКЧ

Структурная схема устройства измерения пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП приведена на (рис. 5) [4-7,9]. Измерение пиковых значений переменных напряжений ИО БМП основана на применении двухканальной измерительной системы с двумя опорными генераторами СВЧ качающейся частоты (ГКЧ_о), частота модуляции (ЧМ) которых изменяется по синусоидальному гармоническому закону, двумя линиями задержки (ЛЗ1) и (ЛЗ2) и двумя смесителями 1 и 2, на входы которых поступают два частотно-модулированных сигнала СВЧ от ГКЧ_о, прямой и задержанный на время $t_3 = \text{const}$ относительно прямых сигналов от ГКЧ_о.

В качестве линий задержки ЛЗ1 и ЛЗ2 широкополосных частотно-модулированных сигналов СВЧ от каждого ГКЧ_о в блоке измерения применены двухметровые отрезки коаксиального кабеля типа РК-50-4-11 с входным и выходным сопротивлениями в 50 Ом для формирования в линиях задержки режима бегущих волн. При данных длинах линий задержек время задержки широкополосных частотно-модулированных сигналов СВЧ составляет около 0,007 мкс.

При этом частоты опорных сигналов (f_o) и смещенных (f_c) меняются во времени по гармоническому закону. В результате смещения (сложения) в смесителях 1 и 2 двух прямых и задержанных колебаний ГКЧ_о на выходе

смесителей образуются биения (рис. 6). Средняя частота $f_0 \gg \Delta f_m$, где Δf_m – девиация частоты (полоса качания) [4,5,7].

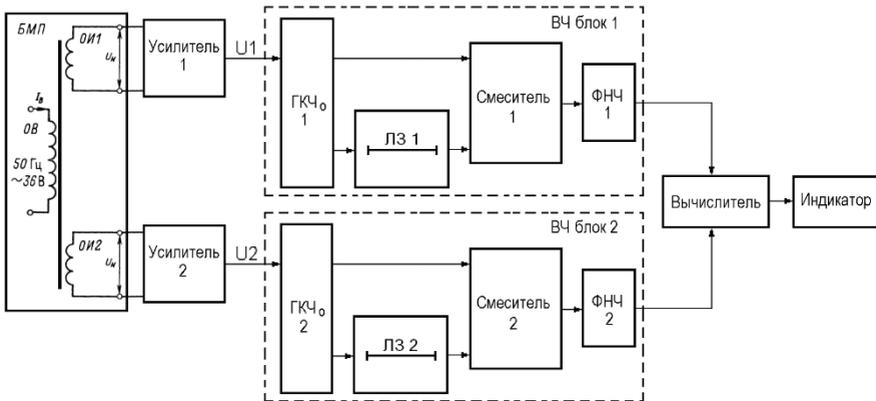


Рис. 5. Измеритель пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП

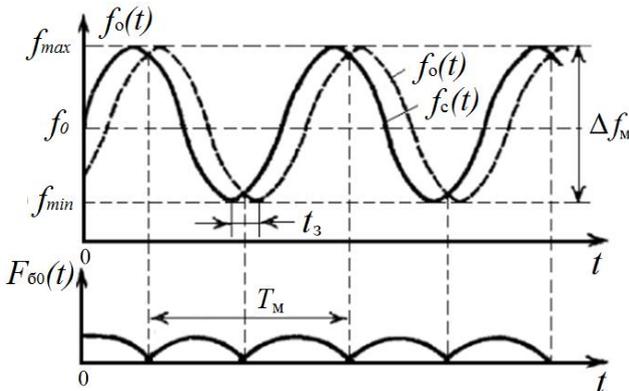


Рис. 6. Изменение частот опорных и смещенных ЧМ сигналов и частот биений в выходной измерительной системе БМП

Частота смещенных во времени сигналов от ИО БМП под действием крутящего момента изменяются таким же образом во времени, что и частоты опорных сигналов, но со сдвигом на время запаздывания $t_3 = \text{const}$ относительно частот опорных сигналов. При этом сдвиг фаз сигналов ГКЧ_о остается постоянным $\Delta\phi = \omega_b \cdot t_3 = \text{const}$, где $2 \cdot \pi \cdot f_b = \omega_b$ – угловая частота переменного электромагнитного поля в ЧЭ (рис. 6).

В результате смещения опорных и задержанных ЧМ колебаний ГКЧ_о образуются биения с частотами $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$. Приращения частот опорных генераторов качающейся частоты ГКЧ_о (разностная частота биений) определяется из (рис. 6), и равны:

$$F_{60}(t) = t_3 \cdot t g \alpha = t_3 \cdot \frac{df_o}{dt} = \frac{df_o}{\omega_b} \cdot \Delta \phi, \quad (4)$$

то есть пропорциональна постоянному сдвигу фаз частотно-модулированных напряжений в результате их запаздывания на время $t_3 = \text{const}$ [4-7,9].

Мгновенные частоты биений равны абсолютным значениям разностей мгновенных значений частот опорного и смещенного частотно-модулированных сигналов генераторов качающейся частоты ГКЧ_о (рис. 6):

$$|F_{60}(t)| = |f_o(t) - f_c(t)|. \quad (5)$$

Средняя частота биений $F_{60}(t)$, которая в течение большей части периода модуляции $T_b = T_m$ остается постоянной, является основной.

Ее значение, как видно из (рис. 6) и формулы (4), равно:

$$F_{60}(t) = \beta \cdot t_3, \quad (6)$$

где: $\beta = df_o / dt = 2 \cdot \Delta f_m \cdot F_m$ – скорость изменения частот генераторов качающейся частоты ГКЧ_о ($\Delta f_m = 20 \div 50$ МГц – девиация частот при несущих частотах ГКЧ $f_o = 200$ МГц, а $f_b = F_m = 50$ Гц – частота модуляции – частота переменного питающего напряжения БМП). Тогда, основная частота биений с учетом (4) будет равна:

$$F_{60}(t) = 2 \cdot \Delta f_m \cdot F_m \cdot t_3, \quad (7)$$

причем на практике девиация частоты Δf_m составляет несколько десятков мегагерц, а $f_m = F_m = 50$ Гц – десятки герц.

IV. Реализация измерителя пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП с помощью широкополосной частотной модуляции ГКЧ

Измеритель пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП реализован следующим образом (рис. 5).

С измерительных обмоток БМП ОИ1 и ОИ2 снимают сдвинутые по фазе под действием крутящего момента друг относительно друга напряжения $U_{и1}$ и $U_{и2}$ с $f_m = F_m = 50$ Гц [2,3,7].

Напряжения $U_{и1}$ и $U_{и2}$ с измерительных обмоток ОИ1 и ОИ2 БМП частотой $F_m = 50$ Гц являются модулирующими напряжениями и через усилители 1 и 2 поступают на модуляционные входы первого ГКЧ_о и второго ГКЧ_о для обеспечения широкополосной частотной модуляции. Сохранившие фазовый сдвиг, сформированные ЧМ сигналы, а именно, опорные сигналы (с ГКЧ_о 1 и ГКЧ_о 2) с частотами $f_o(t)$ и сдвинутые сигналы, за счёт постоянных задержек, с частотами $f_c(t)$ подаются на смесители 1 и 2. К выходам смесителей 1 и 2 подключены фильтры низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2 с полосой пропускания $\Delta F_0 = F_{\delta 0 \max}$, соединенные с входом вычислителя. Вычислитель вычисляет разность $\Delta F_{50}(t)$ частот биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, поступающих с фильтров низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2, которые пропорциональны результирующим ЭДС измерительных катушек $E_{и}(t)$ БМП [2,4,7].

$$|\Delta F_{60}(t)| = |F_{60.1}(t) - F_{60.2}(t)|, \quad (8)$$

Далее разность частот биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, поступает на вход индикатора.

Применение измерителя пиковых значений переменных напряжений измерительных обмоток БМП за один период исследуемого напряжения с широкополосной частотной модуляции позволяет обойти такой недостаток как несимметрия магнитной цепи БМП крутящего момента [4-8, 14]. При несимметрии магнитной цепи преобразователя возникающий сдвиг по фазе между напряжениями $U_{и1}$ и $U_{и2}$ измерительных обмоток БМП при крутящем моменте на валу $M = 0$ не проявляется, так как при выделении частот биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$ влияние данного фазового сдвига измерительных обмоток БМП ликвидируется априори.

Ликвидация влияния возникающего фазового сдвига между напряжениями измерительных обмоток БМП при $M = 0$ достигается путем применения в выходной схеме БМП двух отдельных измерительных каналов измерения напряжений ИО БМП [7]. Ликвидируется также и влияние фазовых сдвигов между напряжениями $U_{и1}$ и $U_{и2}$ измерительных обмоток БМП при действующих крутящих моментах, при $M \neq 0$.

Поэтому выделяемые смесителями протектированные преобразованные сигналы биений $u_{пр.с.1}$ и $u_{пр.с.2}$ с частотами биений $F_{60.1}(t)$ и $F_{60.2}(t)$, поступающие с фильтров низкой частоты ФНЧ 1 и ФНЧ 2 на вычислитель, пропорциональны результирующим ЭДС измерительных катушек $E_{и}(t)$ и не подвержены фазовым сдвигам из-за не симметрии магнитной цепи БМП и действующих крутящих моментах, когда $M \neq 0$ [2,3,7].

Хотя преобразованные сигналы биений $u_{\text{пр.с.1}}$ и $u_{\text{пр.с.2}}$ и несут информацию обо всех фазовых сдвигах между напряжениями $U_{\text{н1}}$ и $U_{\text{н2}}$ измерительных обмоток БМП, вычислитель подсчитывает только средние частоты биений за периоды модуляции $T_{\text{в}} = T_{\text{м}} \text{ГКЧ}_0$ и вычисляет их разность $|\Delta F_{60}(t)| = |\Delta F_{60.1}(t) - \Delta F_{60.2}(t)|$.

Вычислитель преобразует разность частот биений $\Delta F_{60}(t)$ в значения деформации кручения упругого вала. Результат вычисления деформации кручения упругого вала в виде угловых единиц закрутки вала или в значениях торсионных моментов индицируется цифровым индикатором [4-7].

В. Заключение

В работе применен новый подход в построении измерительных выходных схем БМП, основанный на новых технических решениях и методах, и реализованный с применением измерителя фазовых сдвигов сигналов СВЧ генераторов качающейся частоты с широкополосной частотной модуляцией и смешения сигналов СВЧ в смесителях на нулевой промежуточной частоте. Изложенные построения измерительных выходных схем БМП могут найти практическое применение при измерении и контроле торсионных моментов при диагностике и оценке остаточного ресурса рабочих валов энергоемких машин – прессов, компрессоров, насосов атомных электростанций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российским научным фондом (проект №15-19-10026).

© Гордеев Б.А., 2019
© Охулков С.Н., 2019
© Кралин А.А., 2019
© Ермолаев А.И., 2019

Библиографический список

- [1] Иванов Г.М., Новиков В.И., Хмелев В.В., Ермак В.Н. Датчики крутящего момента в системах электроприводов // Электротехническая промышленность. Электропривод. Обзорн. информ. 1987. № 3 (19). М.: Информэлектро, 1987. – 48 с.
- [2] Рыбальченко Ю.И. Магнитоупругие датчики крутящего момента. М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
- [3] Левинтов С.Д., Борисов А.М. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.
- [4] Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Бугайский В.В., Горсков В.П. Частотный метод измерения крутящего момента вращающихся валов // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 3-7.
- [5] Охулков С.Н., Охулков Е.Н. Способ определения крутящего момента, Пат. 2196309 РФ, заявл. 24.04.00; опубл. 10.01.03.

- [6] Гордеев Б.А., Бугайский В.В., Ерофеев В.И., Охулков С.Н. Частотный метод измерения деформации кручения на вращающихся валах машин и механизмов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2006. № 16. С. 62-69.
- [7] Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Дарьенков А.Б., Плехов А.С., Бугайский В.В. Способы снижения погрешностей магнитоупругих датчиков крутящего момента вращающихся валов машин // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. / под ред. В.И. Ерофеева, В.Н. Перевезенцева, С.И. Смирнова. Н. Новгород: Интелсервис, 2014. Т. 23, №1. С. 142-167.
- [8] Бруммель Х.Г., Майер К.У., Линнерт У., Остермайер Й., Пфайфер У. Магнитоупругий датчик крутящего момента, Пат. 2591587 РФ; заявл. 11.04.12; опубл. 20.07.16.
- [9] Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоиздат., 1989. – 208 с.
- [10] Парфенова М.М., Пчелинцева В.Н. Современное состояние и перспективы развития преобразователей крутящего момента. М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1980. – 30 с.
- [11] Костомаров А.С., Могучев М.В., Микитченко А.Я. Датчики обратных связей для электропривода // Вестник ОГУ. 2001. № 3. С. 117-121.
- [12] Andreescu R., Spellman B., Furlani E.P. Residual strain effects on a non-contact magnetoelastic torque transducer // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2010. № 32 (3). P. 183-193.
- [13] Andreescu R., Spellman B., Furlani E.P. Analysis of a non-contact magnetoelastic torque transducer // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. № 320 (12). P. 1827-1833.
- [14] Garshelis I.J., Conto C.R. A magnetoelastic torque transducer utilizing a ring divided into two oppositely polarized circumferential regions // Journal of Applied Physics. 1996. № 79 (8). P. 4756-4758.
- [15] Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

B.A. Gordeyev^{1,2}, **S.N. Okhulkov**^{1,2},
A.A. Kralin², **A.I. Ermolaev**^{1,2}

VOLTAGE PEAK MEASUREMENT OF MAGNETOELASTIC TORQUE SENSOR WINDINGS USING ALIGNMENT OSCILLATOR

¹ Mechanical Engineering Research Institute of RAS
Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. To electromechanical complexes automatization it is necessary to develop reliable measuring methods and means of parameters registration: torque, power, axial shaft force, etc. Currently, reliability requirements are met by non-contact magneto-elastic torque converters (MTC), which are actively used on ships. The operational experience of the MTC has shown its high reliability, which is due to the simplicity of the design and the non-contact signal reception method. At the same time, the torque measurement accuracy by MTC does not meet the requirements due to archaic measuring schemes. A new approach of measuring output circuits development of the MTC based on new technical solutions and implemented using a phase-shift meter and a peak voltage meter with broadband alignment oscillator (AO) frequency modulation (FM) at beat frequency is described. The method is to forming high-frequency signals with frequencies proportional to the measured voltages of the measuring windings (MW) of the MTC. These reference signals are compared with the shifted obtained by delaying the reference signal for a small fixed shift time in the mixer block which calculates the difference frequency – beat frequency. It is shown that the difference in the beat frequencies of two AO is proportional to the voltage difference of the MTC MW, therefore, measuring circuits based on the AO can be used to estimate the angle of shafts rotation. Moreover, in such a measuring circuit there is no decrease in accuracy due to high-frequency interference, phase shift of the voltage in the MW and supply voltage fluctuations.

Keywords: alignment oscillator, beat frequency, elastic shaft, frequency modulation, magnetoelastic converter, output measuring circuit, shaft torsion strain, torque sensor.

References

- [1] G.M. Ivanov, V.I. Novikov, V.V. Khmelev and V.N. Ermak, «Datchiki krutyashchego momenta v sistemakh elektroprivodov (Torque sensors in electric drive systems)», *Elektrotehnicheskaya promyshlennost'. Elektroprivod. Obzorn. inform (Electrical industry. Electric drive. Review inform)*, vol. 3, no. 19, P. 48, 1987. Moscow: Informelectro, 1987 (in Russian).
- [2] Yu.I. Rybalchenko, *Magnitoupругiye datchiki krutyashchego momenta (Magnetoelastic Torque Sensors)*. Moscow: Mashinostroenie, 1981 (in Russian).

- [3] S.D. Levintov and A.M. Borisov, *Beskontaktnyye magnitoprugiye datchiki krutyashchego momenta (Contactless magnetoelastic torque sensors)*. Moscow: Energoatomizdat, 1984 (in Russian).
- [4] B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov, A.S. Plekhov, V.V. Bugayskiy and V.P. Gorskov, «Frequency method of measuring of torque moment of rotating shafts», *Vestnik Mashinostroeniya*, vol. 2, pp. 3-7, 2015.
- [5] S.N. Okhulkov and E.N. Okhulkov, «Sposob opredeleniya krutyashchego momenta (Method for determining the torque)», R.F. Patent 2196309, April 24, 2004 (in Russian).
- [6] B.A. Gordeev, V.V. Bugayskiy, V.I. Erofeev and S.N. Okhulkov, «The frequency method of turning deformation measurement on rotors of mechanisms», *Bulletin of VSAWT*, vol. 16, pp. 62-69, 2006.
- [7] B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov, A.B. Darienkov, A.S. Plekhov and V.V. Bugayskiy, «Sposoby snizheniya pogreshnostey magnitoprugikh datchikov krutyashchego momenta vrashchayushchikhsya valov mashin (Methods of reducing errors of magnetoelastic torque sensors of rotating shafts of machines)», *Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya (Applied Mechanics and Engineering Technologies)*, V.I. Erofeev, V.N. Perevezentsev, S.I. Smirnov, Novgorod: Intelservis, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 142-167 (in Russian).
- [8] H.G. Brummel, K.U. Maier, U. Linnert, J. Ostmeier and U. Pfeifer, «Magnitoprugiye datchiki krutyashchego momenta (Magnetoelastic torque sensor)», R.F. Patent 2591587, July 20, 2016 (in Russian).
- [9] V.A. Viktorov, B.V. Lunkin and A.S. Sovlukov, *Radiovolnovyye izmereniya parametrov tekhnologicheskikh protsessov (Radio wave measurements of the parameters of technological processes)*. Moscow: Energoizdat, 1989 (in Russian).
- [10] M.M. Parfenova and V.N. Pchelintseva, *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya preobrazovateley krutyashchego momenta (Current status and development prospects of torque converters)*. Moscow: TSNIITEI priborostroyeniya (Central Scientific Research Institute of Instrument Engineering and Instrument Engineering), 1980 (in Russian).
- [11] A.S. Kostomarov, M.V. Moguchev and A.Ya. Mikitchenko, «Sensitive elements of inverse connections for electric drive», *Vestnik of OSU*, vol. 3, pp. 117-121, 2001.
- [12] R. Andreescu, B. Spellman and E.P. Furlani, «Residual strain effects on a non-contact magnetoelastic torque transducer», *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 32, no. 3, pp. 183-193, Apr. 2010.
- [13] R. Andreescu B. Spellman and E.P. Furlani, «Analysis of a non-contact magnetoelastic torque transducer», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 12, pp.1827-1833, June 2008.
- [14] I.J. Garshelis and C.R. Conto, «A magnetoelastic torque transducer utilizing a ring divided into two oppositely polarized circumferential regions», *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 8, pp. 4756-4758, May 1996.
- [15] V.A. Eliseev and A.V. Shinyansky, *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu (Handbook of automated electric drive)*. Moscow: Energoatomizdat, 1983 (in Russian).

НАШИ АВТОРЫ**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

Абдулваххаб Мохаммед Валид – аспирант Белгородского государственного технологического университета им В.Г. Шухова; **mz_d1984@mail.ru**

Андреев Георгий Алексеевич – студент Волжского государственного университета водного транспорта; **georgijandreev0187@gmail.com**

Артемов Игорь Николаевич – старший преподаватель Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева; **artemovin78@mail.ru**

Бурмакин Олег Анатольевич – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, кандидат технических наук; **boa_71@mail.ru**

Вуколов Владимир Юрьевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **vvucolov@mail.ru**

Горшкова Дарья Михайловна – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **gorshkovadaria71@gmail.com**

Гуляев Владимир Викторович – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, кандидат технических наук; **evvt@mail.ru**

Ефимов Александр Юрьевич – доцент Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, кандидат технических наук; **sem314@yandex.ru**

Жилин Евгений Витальевич – доцент Белгородского государственного технологического университета им В.Г. Шухова, кандидат технических наук; **zhilinevg@mail.ru**

Калинин Евгений Владимирович – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **chernmaza@yandex.ru**

Кочеганов Дамир Михайлович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **dk402@yandex.ru**

Кузнецова Лидия Владимировна – клинический ординатор Московского государственного университета пищевых производств; **adil.93@mail.ru**

Молоков Александр Олегович – студент Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева; **molokov_1998@mail.ru**

Петров Антон Александрович – руководитель отдела разработки Научно-исследовательского предприятия общего машиностроения; **petrov85@inbox.ru**

Попов Сергей Васильевич – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, кандидат технических наук;

popovsev3@yandex.ru

Серебряков Артем Владимирович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **artemserebryakov@yandex.ru**

Симонова Екатерина Валерьевна – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

kv.simonova@mail.ru

Смирнов Александр Юрьевич – ведущий инженер-конструктор Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, доктор технических наук; **a_yu_smirnov@mail.ru**

Чеботарь Виктор Игоревич – врач-хирург ООО «Центр хирургии» (Нижний Новгород); **9200015642@mail.ru**

Чивенков Александр Иванович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, доктор технических наук; **chyvenkov@mail.ru**

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Алешин Дмитрий Александрович – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

dima2995@mail.com

Вихорев Николай Николаевич – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **nrvikhorev@gmail.com**

Гордеев Борис Александрович – главный научный сотрудник лаборатории Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН», доктор технических наук; **gord349@mail.ru**

Ермолаев Артем Игоревич – младший научный сотрудник лаборатории Института проблем машиностроения РАН; **acidwolfvx@rambler.ru**

Кралин Алексей Александрович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, кандидат технических наук; **akralin@yandex.ru**

Охулков Сергей Николаевич – старший научный сотрудник лаборатории Института проблем машиностроения РАН, кандидат физико-математических наук; **oxulkovs@mail.ru**

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION**

**NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 4

Nizhny Novgorod 2019

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2019. No. 4 (8). – 119 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

Electronic version of the journal:

<http://www.ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2019

CONTENTS

CHRONICLES	4
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	6
V.Yu. Vukolov, A.A. Petrov, D.M. Gorshkova, E.V. Simonova Peculiarities of implementation of microprocessor relay protection against arc fault of module of section with voltage 0.4 – 35 kV	6
A.Yu. Efimov, A.O. Molokov, I.N. Artemov Loss reduction in distribu- tion networks of 6/10 kV by transition to 20 kV voltage	17
D.M. Kocheganov, A.V. Serebryakov Fuzzy logic system for assess- ment of frequency converter operating quality	27
O.A. Burmakin, V.V. Gulyaev, S.V. Popov, G.A. Andreev Matlab simulink application for analysis of ship electrical power system opera- tion modes	35
E.V. Zhilin, M.W. Abdulwahhab Features of influence of distributed generation on power flow distribution of electric network of Iraq	44
E.V. Kalinin, A.I. Chivenkov Sharp surface effect in joints of laminat- ed cores of power transformers	52
A.Yu. Smirnov, V.I. Chebotar, L.V. Kuznetsova Design of electro- magnetic surgical retractor for plastic surgery application	68
P.V. Terentyev, D.A. Filatov, A.Yu. Zakharov, A.S. Simonov Con- sideration of various schemes for connecting power plants based on pho- toelectric solar modules to enhance energy efficiency of electrical com- plexes in rural areas	79
POWER ENGINEERIN	91
D.A. Aleshin, N.N. Vikhorev Two-channel bridgeless rectifier	91
B.A. Gordeyev, S.N. Okhulkov, A.A. Kralin, A.I. Ermolaev Voltage peak measurement of magnetoelastic torque sensor windings using alignment oscillator	100
Authors	114

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 20.12.2019. Дата выхода в свет: 27.12.2019

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.