

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ВТОРАЯ РОССИЙСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ  
ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА  
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ»**

(Грант РФФИ 14-38-10196)



**Томск  
29-31 октября 2014 г.**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**



**ВТОРАЯ РОССИЙСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ  
ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА  
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ»**

**(Грант РФФИ 14-38-10196)**

**Томск - 2014**

УДК 620.9+621.3(063)

ББК 31+31.2л.0

Э651

**Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи:** материалы Второй российской молодежной научной школы-конференции / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «СКАН», 2014. - 273 с.

Настоящий сборник содержит материалы Второй российской молодежной научной школы-конференции, проведенной 29-31 октября 2014 г. на базе Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основной целью проекта является развитие научного потенциала молодых исследователей в области электроэнергетики и электромеханики, активизация процесса обмена новыми идеями и разработками, стимулирование творческого мышления среди молодежи.

**УДК 620.9+621.3(063)**

**ББК 31.1+31.2л.0**

*Редакционная коллегия:*

**Ивашутенко А.С.**, к.т.н., доцент каф. ЭПП ЭНИН ТПУ

**Богданов Е.П.**, к.т.н., доцент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ

**Усачева Т.В.**, к.т.н., доцент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ

Редакционная коллегия уведомляет:  
доклады в сборнике представлены в авторской редакции.

*Российская молодежная научная конференции «Энергетика,  
электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи»  
проводится по гранту РФФИ 14-38-10196.*

© Э651

Состав организационного и программного комитетов  
Второй российской молодежной научной школы-конференции  
**«Энергетика, электромеханика  
и энергоэффективные технологии  
глазами молодежи»**

Завьялов Валерий Михайлович	Директор ЭНИН ТПУ, д.т.н., профессор, председатель оргкомитета
Стрижак Павел Александрович	Зам. директора ЭНИН ТПУ по научной работе, д.ф.-м.н., профессор, сопредседатель оргкомитета
Прохоров Антон Викторович	Зам. директора ЭНИН ТПУ по учебной работе, к.т.н., доцент
Винников Дмитрий	Д.т.н., профессор Таллиннского технического университета (г. Таллинн, Эстония)
Харитонов Сергей Александрович	Д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск)
Ивашутенко Александр Сергеевич	К.т.н., доцент каф. ЭПП ЭНИН ТПУ, сопредседатель оргкомитета
Муравлев Олег Павлович	Д.т.н., профессор каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ, председатель секции 1, круглого стола 4
Гарганеев Александр Георгиевич	Зав. каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ, д.т.н., профессор,
Литвак Валерий Владимирович	Д.т.н., профессор кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ,
Богданов Евгений Петрович	К.т.н., доцент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ, зам. председателя оргкомитета
Усачева Татьяна Васильевна	К.т.н., доцент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ, ученый секретарь конференции
Лукутин Алексей Владимирович	Начальник учебно-методического отдела ЭНИН ТПУ, к.т.н., доцент
Киселев Александр Викторович	К.т.н., доцент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ, председатель секции 2, круглого стола 3
Дорохина Екатерина Сергеевна	Ассистент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ, секретарь секции 1, круглого стола 4
Голдовская Анастасия Александровна	Ассистент каф. ЭКМ ЭНИН ТПУ, секретарь секции 2, круглого стола 3

## СЕКЦИЯ 1. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

---

### ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ С ЦЕЛЬЮ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Васильев И.С.\* Ефермов С.В.\* Ким В.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

\*Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск, Красноярский край

Одной из основных задач, стоящей перед разработчиками вновь проектируемых и изготавливаемых перспективных космических аппаратов (КА) является обеспечение максимально возможного уровня энергетических мощностей, направленных на решение целого спектра задач с минимальными потерями. При этом инженеру-проектировщику систем КА необходимо обеспечить максимальный уровень надежности, а также необходимую степень минимизации массы. Современные КА являются сложными техническими устройствами, выполняющие функции связи, навигации, метеонаблюдений, геодезии и многих других важных государственных задач. Для обеспечения решения данных задач необходим целый спектр оборудования, которое бесперебойно функционирует в жестких условиях космического пространства. С возрастанием количества выполняемых задач КА одновременно происходит увеличение его энергетических мощностей. Так за последние десять лет отечественные КА увеличили свою мощность более чем в 2 раза. Мощность современных КА изготавливаемых в открытом акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (ОАО «ИСС») достигает до 15 кВт и эта величина не является предельной. Однако, с увеличением энергетической мощности происходит общее увеличение массы КА, так как устанавливается все большее количество функционального оборудования. Поэтому перед разработчиком КА также стоит задача в обеспечении всех возможных вариантов по уменьшению массы. Одним из основных направлений, обеспечивающих решение данной задачи, является экспериментальная отработка и последующая эксплуатация новых более легких материалов.

Для бесперебойного функционирования оборудования КА в условиях космического пространства необходимо обеспечить бесперебойную передачу электрической энергии от солнечной или от аккумуляторной батареи к бортовой аппаратуре. Для выполнения данной задачи на борту КА используется система бортовой кабельной сети (БКС КА). БКС КА является одной из основных систем, входящих в состав КА, и которая объединяет собой все электрические и электронные устройства КА. В результате БКС КА является одной из систем, которая существенно влияет на общую массу КА. В настоящее время масса БКС составляет 5...10 % от общей массы КА. В итоге обеспечение минимально возможной массы является одной из приоритетных задач.

В настоящее время для изготовления кабелей для КА используются медные посеребренные провода с фторопластовой или полиимидной изоляцией с подслоем фторопласта. До настоящего времени снижение массы данных проводов могло быть обеспечено лишь использованием более легкой и тонкой изоляции. Однако сегодня фактически достигнут возможный предел по данному направлению уменьшения массы.

В результате была поставлена задача по определению возможности эксплуатации проводов с более легким материалом токопроводящих жил. В результате было предложено решение по отработке проводов с алюминиевыми посеребренными жилами. Но внедрение данного решения влечет за собой ряд не решенных задач, одной из которых является отработки технологии пайки, обеспечивающей надежное электрическое соединений алюминиевых проводов (АП) с хвостовиком контакта соединителя.

Для решения данной задачи была проведена отработка технологии пайки АП. В качестве объекта испытаний были выбраны АП двух типоразмеров с сечением жил 0,336 и 0,597 мм<sup>2</sup>. Известно, что удельное электрическое сопротивление АП имеет большее значение около 62 % по сравнению с медной токопроводящей жилой [1]. Следовательно, для обеспечения эквивалентной величины электрической проводимости необходимо увеличение сечения токопроводящей жилы АП примерно на 62 % соответственно. В результате можно получить таблицу соответствия между стандартными рядами сечений медных проводов и АП.

**Таблица 1.** Соответствие медных посеребренных проводов и АП

Сечение медного провода, мм <sup>2</sup>	Масса медного провода, г/м	Мех. прочность при растяжении, Н/мм <sup>2</sup>	Сечение АП, мм <sup>2</sup>	Масса АП, г/м	Мех. прочность при растяжении, Н/мм <sup>2</sup>	Различие массы, %
0,2	2,51	55	0,336	1,76	40,32	42
0,35	4,03	60	0,597	2,72	71,64	48

Для проведения отработки пайки АП были выбраны три вида припоя и изготовлены три вида флюса, а именно:

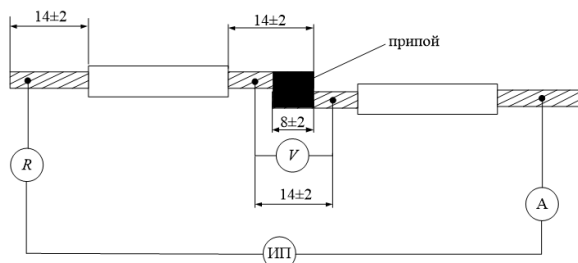
- Sn<sub>62</sub>Pb<sub>36</sub>Ag<sub>2</sub> иностранного производства и соответствующий требованиям [2] и имеющий температуру пайки 235 ± 5 °С. Данный припой содержит в себе флюсовый сердечник FLR 1%, длительность пайки составляет не более 5 секунд;
- ПсрОС 2-58 отечественного производства и соответствующий требованиям [3] и имеющий температуру пайки 235 ± 5 °С с длительностью пайки не более 5 секунд;
- ПсрОС 3-58 отечественного производства и соответствующий требованиям [3] и имеющий температуру пайки 240 ± 5 °С с длительностью пайки не более 5 секунд;
- флюсы ФВЦА, ФДГл, ЛТИ – 120, изготовленные в соответствии с требованиями [4].

Для проведения отработки пайки были изготовлены образцы АП длиной 50 мм, которые были запаяны внахлест между собой, а также отрезки АП длиной 100 мм, которые были запаяны в хвостовики соединителей. Пайка производилась с использованием различных сочетаний флюсов и припоев. В результате отработки пайки АП было изготовлено по 35 образцов соединений АП внахлест с каждым типоразмером провода, при этом на каждый вариант сочетания припойных материалов было отведено по 5 образцов. Общее количество соединений АП запаянных в хвостовики соединителей составило 268 образцов. После проведения пайки, полученные образцы подверглись испытаниям на прочность при растяжении и прошли проверку падения напряжения в области пайки до и после воздействия термовакуумных испытаний. Режимы термовакуумных испытаний были максимально приближены к реальным условиям космического пространства, а именно:

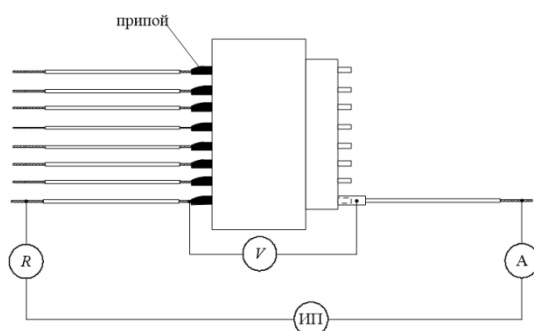
- атмосферное давление: 1,33·10<sup>-3</sup> Па (10<sup>-5</sup> мм рт. ст.);
- квалификационный диапазон температуры термоциклирования: от минус 120 до 110°С;
- скорость изменения температуры: ± 5...6 °С/мин;

- длительность выдержки при максимальной и минимальной температуре была не менее 15 минут;
- объем термоциклирования: 200 термоциклов.

Определение величины падения напряжения в соединениях АП запаянных внахлест и в хвостовики контактов соединителей выполнялось по схемам, указанным на рисунках 1 и 2.

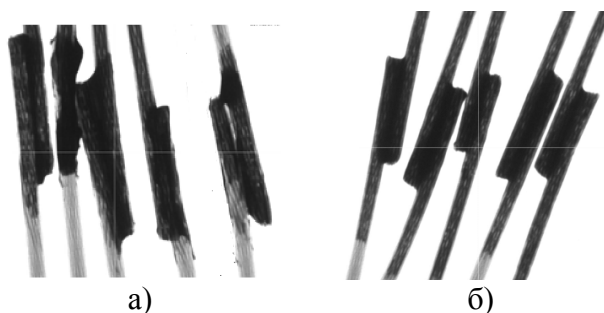


**Рис. 1.** Схема измерения падения напряжения в паянных соединениях АП внахлест



**Рис. 2.** Схема измерения падения напряжения в паянных соединениях АП в хвостовиках соединителей

Для определения качества паяных соединений внахлест был также использован неразрушающий метод рентгенконтроля с помощью полуавтоматической системы высокого разрешения РСВА-Analyser. Общий сравнительный вид полученных образцов с использованием припойных материалов иностранного производства и припойных материалов отечественного производства показан на рисунке 3



**Рис. 3.** Сравнительный вид полученных образцов соединений АП внахлест  
а) соединения АП с использованием припоя Sn<sub>62</sub>Pb<sub>36</sub>Ag<sub>2</sub>;  
б) соединения АП с использованием припоя ПСрОС2-58 и флюса ЛТИ-120

Как видно из приведенных фотографий пайка АП выполненная с использованием припойных материалов отечественного производства имеет лучшее качество. Однако не все отечественные флюсы также безупречно подходят для выполнения процедуры

пайки. Наилучшими результатами обладает паяные соединения АП с использованием припоя марки ПСрОС 2-58 и флюса ЛТИ-120, обладающими наилучшими свойствами технологичности и результатами испытаний.

По полученным результатам испытаний на падение напряжения и на механическую прочность при растяжении до и после термовакуумных испытаний было определено, что значения падения напряжения и механической прочности при растяжении близки между собой независимо от варианта сочетания припойных материалов за исключением иностранных материалов. Механическая прочность паяных соединений была выше прочности АП. Разрушение соединения происходило в случае иностранного припоя. Часть результатов испытаний паяных соединений приведена в таблице 2.

**Таблица 2.** Пример части результатов испытаний соединений АП внахлест до и после термовакуумных испытаний

№	Сечение АП, мм <sup>2</sup>	Вариант пайки	U <sub>пад</sub> , мВ	I, А	R, мОм	Мех. прочность, Н	Область обрыва
1	0,6	Sn <sub>62</sub> Pb <sub>36</sub> Ag <sub>2</sub> (FLR 1 %)	3,0	5,0	0,60	80,66	пайка
2			3,6		0,72	40,88	пайка
3*			4,8		0,96	64,61	пайка
4*			4,2		0,84	72,84	провод
6а		ПсрОС 2-58 (ФВЦА)	4,3		0,86	86,00	провод
7а			3,5		0,70	78,66	провод
8а*			3,8		0,76	81,55	провод
9а*			4,1		0,82	78,57	провод
6б		ПсрОС 2-58 (ФДГл)	2,4		0,48	84,35	провод
7б			2,4		0,48	80,39	провод
8б*			2,2		0,44	81,44	провод
9б*			3,0		0,60	70,74	провод
6в		ПсрОС 2-58 (ЛТИ – 120)	2,1		0,42	78,58	провод
7в			2,8		0,56	91,58	провод
8в*			2,7		0,54	84,77	провод
9в*			2,5		0,50	82,50	провод

\* – Результаты испытаний после проведения 200 термоциклов

Для окончательного определения возможности эксплуатации АП в БКС КА необходимо провести ряд дополнительных испытаний, включающих в себя более широкий спектр воздействий, таких как воздействие механических и вибрационных нагрузок, климатических воздействий и термовакуумных испытаний под токовой нагрузкой с выполнением не менее 500 термоциклов в квалификационном диапазоне температур от минус 120 до 110 °С. В результате проделанной работы будет подтверждена возможность эксплуатации АП в определенных участках БКС КА в условиях открытого космического пространства в течение 15 и более лет, что обеспечит уменьшение массы КА, позволит увеличить массу полезной нагрузки с последующим расширением выполняемых задач и повышением энергоэффективности КА.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с., ил.
2. ECSS-Q-70-71A. Space product assurance. Data for selection of space materials and processes. European cooperation for space standardization. 2004. – 222 p.



3. ГОСТ 19738-74. Припой серебряные. Марки. Введ. 1975-01-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1975. 7 с.
4. ОСТ 4Г 0.033.200. Припой и флюсы для пайки. Марки, состав свойства и область применения. Введ. 1980-01-01. Ред. 1-78. – М.: Радиостандарт-ЦНИИРЭС.2011,131 с.

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО БЛОКА СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ**

Трофимов В.В., Пашали Д.Ю.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Согласно статистике Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) около 17,5 миллионов людей ежегодно умирают от сердечно-сосудистой патологии, что составляет 30% от всех смертей. Разработка аппаратов для искусственного кровообращения (далее АИК) и их функциональных узлов с повышенной надежностью и быстродействием является актуальной научно-технической задачей.

К современному АИК предъявляют следующие основные требования:

- АИК должен надежно поддерживать на протяжении всей перфузии заданный минутный объем кровообращения в организме (порядка 4÷5 литров для взрослого больного) и заданную температуру циркулирующей крови;
- оксигенатор должен обеспечивать адекватную артериализацию крови (насыщение ее кислородом не ниже чем до 95% и поддержание рСО<sub>2</sub> на уровне 35÷45 мм. ртутного столба);
- объем заполнения АИК должен быть небольшим (не более трех литров при перфузии взрослых больных);
- АИК должен быть снабжен устройством для возврата в циркуляторный контур крови, изливающейся из вскрытых полостей сердца и поврежденных тканей;
- травма крови в АИК должна быть минимальной (не более 40 мг/л свободного гемоглобина плазмы за первый час перфузии);
- физиологически блок АИК должен изготавливаться из нетоксичного материала, химически инертного по отношению к крови;
- конструкция АИК должна обеспечивать возможность очистки и стерилизации в условиях клиники.

Любой АИК состоит из двух блоков: физиологического и механического. К физиологическому блоку относятся все детали, соприкасающиеся с кровью.

Механический блок состоит из электрического привода, содержащего систему управления и электрический двигатель.

Авторами разработан электромеханический блок (ЭМБ) геосовместимых систем вспомогательного кровообращения (ГСВК) имплантируемого подключения, который включает (рис. 1): высокоскоростной вентильно-индукторный двигатель (ВВИД); насос крови (НК); систему управления, контроля и диагностики состояния, располагаемую на поясе пациента и соединенную с ЭМБ токоподводящим кабелем; источник питания, располагаемый на поясе пациента; резервный источник питания, на базе генератора возвратно-поступательного движения, позволяющий повысить надежность конструкции.

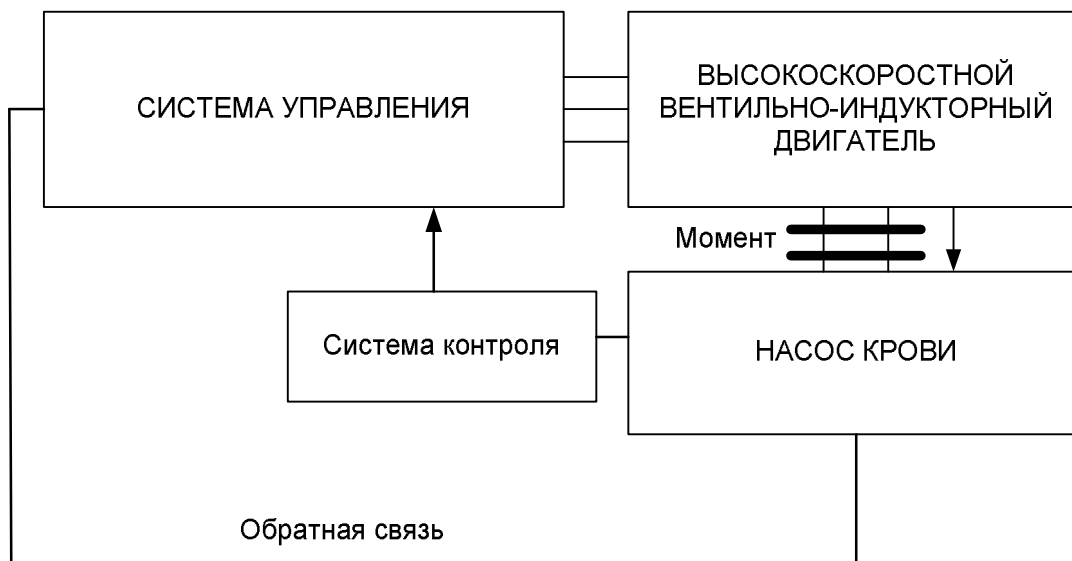


Рис. 1. Структурная схема ГСКВ

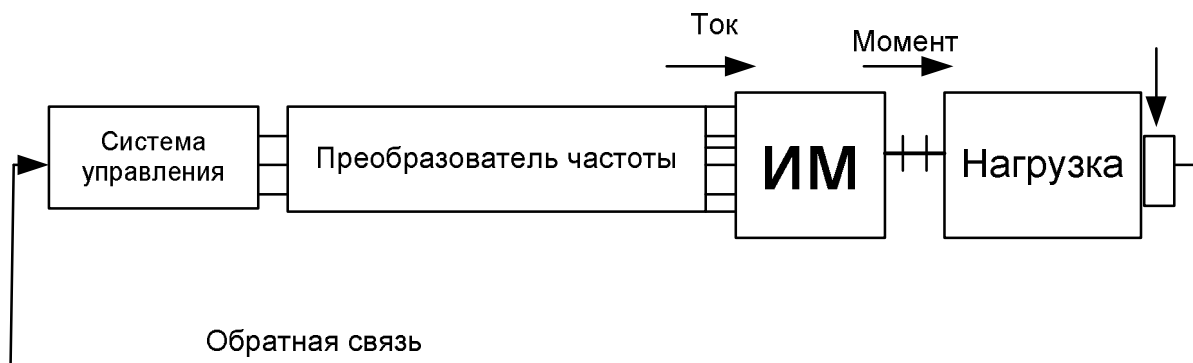


Рис. 2. Структурная схема ВВИД

Таблица 1. Технические характеристики двигателя и равнение их с аналогами

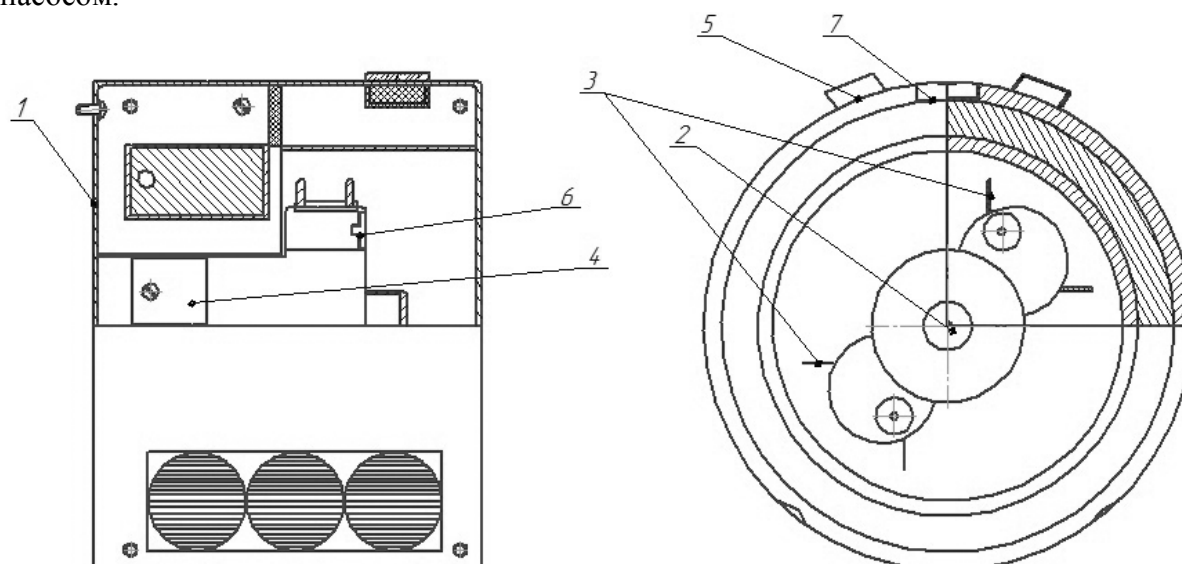
Техническая характеристика	ВВИД	Аналог 1
Мощность, кВт	5	7
Напряжение питания, В	230	380
Номинальная частота вращения, об/мин	9000	6000
Номинальный КПД	0,9	0,88
Внутренний диаметр статора, мм	130	131
Число фаз	3	3

В таблице 1 приведено сравнение технических характеристик разработанного двигателя и аналога. Структурная схема приведена на рис. 2.

Особенностью разработанного ВВИД является оперативное включение в работу, что обеспечивает выполнение моментальных работ по спасению человека, в том числе пациентов в состоянии кардиогенного шока.

В составе ЭМБ в качестве НК, для повышения надежности устройства, авторами предложена оригинальная конструкция роликового насоса для перекачки крови, которая содержит сферический разъемный герметичный корпус 1 с окнами и расположенный в нем ротор 4. Ротор 4 образован из диска и шарнирно соединенного с

ним полудиска. Диск ротора делит корпус на две полусферы (на рисунке не показаны), из которых одна имеет упомянутые окна, а полудиск делит ее на рабочие камеры (на рисунке не показаны). Ведомый элемент представляет собой полудиск. Ведущий диск установлен в кольцевом пазу, выполненном по линии разъема полусфер, с возможностью вращения. Рабочие камеры заполнены рабочей жидкостью, окна герметично перекрыты упругими мембранами и расположены в плоскости, перпендикулярной плоскости диска, в другой полусфере расположено приводное устройство вращения ротора и изменения угла наклона полудиска к диску, соединенное с ротором при помощи шарнира, состоящего из водила и стержня и расположенного в углублении, находящемся в центре шарнирного соединения ротора. Насос 2, выполняющий функцию вращательного движения против часовой стрелки, с помощью вала 4 ВВИД. Удерживающие щупы 3 для крепления, медицинского комплекта силиконовых трубок. Датчик 5,7 для подтверждения закрывания крышки насоса, и щупов крепления трубок. Механизм 6, служит для работы системы ручном режиме. Насос включает систему управления (на рисунке не показана). При отключении электроэнергии конструкция позволяет использовать ручной режим управления насосом.



**Рис. 3.** Роликовый насос для перекачки крови

Разработан электромеханический блок геосовместимых систем вспомогательного кровообращения имплантируемого подключения, включающий: высокоскоростной вентиляльно-индукторный двигатель; роликовый насос для перекачки крови; систему управления, контроля и диагностики состояния, располагаемую на поясе пациента и соединенную с ЭМБ токоподводящим кабелем; источник питания, располагаемый на поясе пациента; резервный источник питания, на базе генератора возвратно-поступательного движения.

Особенностью разработанного ВВИД является оперативное включение в работу, что обеспечивает выполнение моментальных работ по спасению человека, в том числе пациентов в состоянии кардиогенного шока.

Оригинальная конструкция управляемого роликового насоса для перекачки крови позволяет повысить надежность системы за счет возможности ручного управления насосом при аварийном отключении электроэнергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голландцев Юрий Алексеевич. Вентильные индукторно-реактивные двигатели прецизионных следящих систем электропривода : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.01 СПб., 2004 296 с. РГБ ОД, 71:05-5/738
2. Мороз, В. В. Имплантируемая система вспомогательного кровообращения на базе мехатронных модулей: монография / В.В. Мороз [и др.]. Владим. гос. ун-т – Владимир. Изд-во Владимир. гос. ун-та. 2006. 134 с.
3. Шумаков, В. И. Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение / В. И. Шумаков, В. Е. Толпекин, Д. В. Шумаков. – М. : Янус-К, 2003. – 376 с.
4. Наши партнеры – Центр хирургии сердца. <http://cardiosur.ru>. (дата обращения 30.05.2012).
5. Наши партнеры – «Компания УТМ» (дата обращения 25.05.2013).
6. Наши партнеры – «Республиканский кардиологический диспансер» (дата обращения 20.02.2012)

## К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ГИБРИДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Хакимова А. Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Гибридный магнитный подшипник (ГМП) – электромеханическое устройство, предназначенное для фиксации роторной системы в заданном положении относительно неподвижной части посредством взаимодействия магнитных потоков постоянного магнита на подвижной части и неподвижного электромагнита. ГМП - электротехнический комплекс, содержащий активный магнитный подшипник (АМП), блок управления и другие типы подшипниковых опор.

ГМП можно разделить:

- по управляемости: управляемые и неуправляемые. К управляемым соответственно относятся те конструктивные схемы ГМП, где возможен контроль и управление положением ротора. К неуправляемым относятся те конструктивные схемы, где управление положением ротора невозможно, например комбинация механических подшипников и магнитных подшипников на постоянных магнитах.
- по алгоритму управления можно выделить: бессенсорный способ управления, по датчикам перемещения, и по косвенным измерениям, например по внешнему магнитному полю.
- по наличию постоянных магнитов: конструктивные схемы с постоянными магнитами или без них (например, газоманитные ГМП).
- по назначению постоянных магнитов в ГМП: создание силы отталкивания, усиление магнитного потока АМП или пассивное демпфирование колебаний.
- по типу размещения страховочных подшипников. ГМП могут быть с интегрированными страховочными подшипниками, или с дополнительно установленными.
- по направлению намагниченности используемых постоянных магнитов: с радиальным направлением намагниченности и осевым.

Ниже представлен ряд основных конструктивных схем радиальных ГМП, при этом важно отметить, что большинство из них могут быть также выполнены и для обеспечения осевой жесткости ротора.

**Таблица 1. Конструктивные исполнения ГМП**

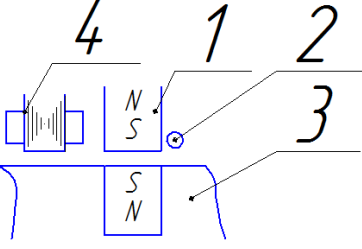
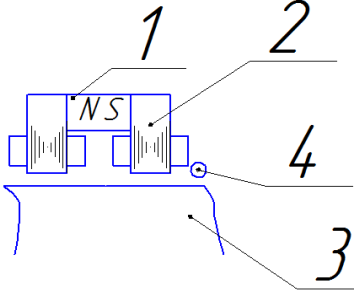
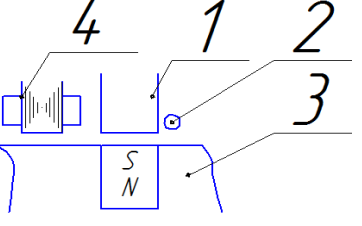
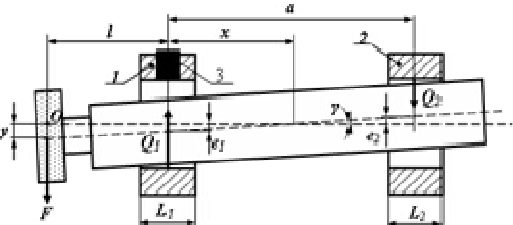
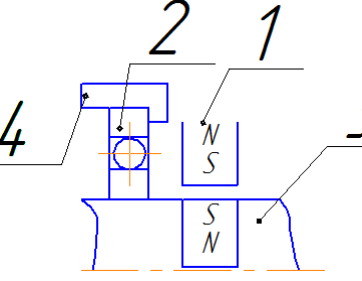
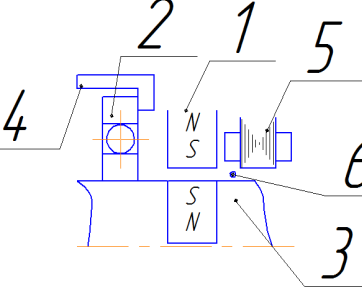
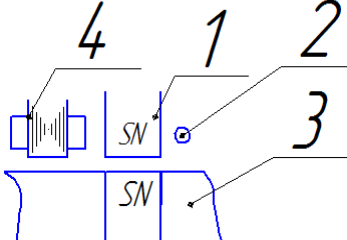
№	Конструктивная схема ГМП	Описание
1		<p>ГМП, в котором сила в рабочем зазоре создается магнитным подшипником на постоянных магнитах (МППМ); 1– магнитные подшипники на постоянных магнитах; 2– датчики положения ротора; 3– вал; 4– АМП.</p>
2		<p>ГМП, в котором постоянные магниты усиливают магнитный поток создаваемый АМП; 1– вставка из постоянных магнитов; 2– АМП; 3– вал; 4– датчики положения ротора.</p>
3		<p>ГМП с пассивным демпфером колебаний; 1– пассивный демпфер колебаний; 2– датчики положения ротора; 3– вал; 4– АМП.</p>
4		<p>Газомагнитный ГМП [Щетинин]; 1 – передний газомагнитный подшипник; 2 – задний газостатический подшипник; 3 – электромагнит.</p>
5		<p>ГМП, в котором совместно используются МППМ и механические подшипники; 1– магнитные подшипники на постоянных магнитах; 2– механический подшипник; 3– вал; 4– подшипниковой щит.</p>
6		<p>ГМП с дополнительно установленными страховочными подшипниками; 1– магнитные подшипники на постоянных магнитах; 2– механический подшипник (страховочный подшипник); 3– вал; 4– подшипниковой щит; 5–АМП; 6– датчик положения ротора.</p>

Таблица 2. Продолжение

7		<p>Гибридный магнитный подшипник с интегрированными страховочными подшипниками; вал 1, корпус 2, внешнюю втулку 3, установленную в корпусе 2, внутреннюю втулку 4, установленную на валу 1, внешние кольцевые постоянные магниты 5 запрессованные в внешнюю втулку 3, посредством стопорного кольца 6 внутренние кольцевые постоянные магниты 7, запрессованные в внутреннюю втулку 4, посредством стопорного кольца 8, ферромагнитные накладки 9, установленные на валу 1, электромагнитную систему управления 10.</p>
8		<p>Гибридный магнитный подшипник с управлением по внешнему магнитному полю; корпус 1, в котором установлен датчик внешнего магнитного поля 2, электрически соединенный с силовым преобразователем 3 и магнитные подшипники на постоянных магнитах, которые представляют собой внешний 4 и внутренний 5 кольцевые постоянные магниты, причем внешний магнит жестко закреплен в корпусе, а внутренний на валу 6, два электромагнита 7.</p>
9		<p>ГМП с МППМ с кольцами, установленными со смещением; статор-1, ротор-2, насаженный на сплошной вал-3, установленные в корпусе-4, пассивные магнитные подшипники -5,6, состоящие из внешнего и внутреннего кольца, установленные со смещением между внешним и внутренним кольцом, конический гибридный магнитный подшипник-7.</p>

Таблица 3. Продолжение

10		ГМП, в котором сила в рабочем зазоре создается МППМ с осевой намагниченностью; 1– МППМ с осевой намагниченностью; 2– датчики положения ротора; 3– вал; 4– АМП.
----	---	--

Таким образом, в работе предложена классификация систем гибридных магнитных подшипников, которая является базой для их дальнейших фундаментальных исследований и может быть использована при разработки их обобщенного математического описания.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании систем с гибридными магнитными подшипниками.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шаров В.С. «Особенности расчета магнитного подвеса роторов высокоскоростных шпинделей электродвигателей» - М.: МЭИ, 1982-84с.
2. Герасин А.А., Исмаилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Анализ осевой составляющей силы отталкивания в многокольцевых магнитных подшипниках с осевым направлением намагниченности // Сборка в машиностроении, приборостроении – 2012 - №10. С. 14-18.
3. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники : теория, расчет, применение / Ю.Н.Журавлев.-СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.

### МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ МИКРОГЭС

Номоконова Ю. А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Термин «мехатроника» придуман японцами для описания комбинации механической и электронной техники. В частности, это относится к научно-техническому подходу в описании систем проектирования. Мехатроника представляет собой перспективное поколение машин, роботов и интеллектуальных механизмов для проведения работ с применением автоматизации в различных отраслях, например, промышленной, офисной, бытовой.

Как дисциплина, мехатроника охватывает электронику, дополняющую механику (для обеспечения высокого уровня точности и надежности) и электронику, заменяющую механику (для обеспечения новых функций и возможностей). Простыми типами мехатронных устройств являются выключатели, реле, соленоиды и другие. А вот примерами приборов, которые уже перешли к разряду мехатронных устройств от простых механических изделий являются: станки включающие ЧПУ; электроприводы автомобильного руля; электронные измерительные системы; электронные часы, включающие мелкие механические детали и сложные электронные схемы; электронные потребительские товары – стиральные машины, электронные приборы для приготовления пищи, факс, копировальная техника и другие.



Рис. 1. Характерные составляющие мехатроники

В течение последних двадцати лет технология производства осуществляется с применением измерительных приборов, таких как электронные датчики, инструменты контроля качества, измерительные лазерные системы и другие, обеспечивающие высокие размерные точности и повышающие производительность производства.

В области автоматизации производства мехатроника является перспективной и сейчас, и в будущем. Правильное применение, использование и техническое обслуживание этих высокотехнологичных продуктов и систем является важным аспектом, что обеспечивает повышение производительности и качества производимой продукции. Очевидно, что разработка и производство будущих приборов будет включать сочетание прецизионных механических и электронных систем, и мехатроника будет являться определяющей компонентой в приборах и в технологии их производства.

Модернизация управления тиристорным регулятором балластной нагрузки микроГЭС позволяет существенно повысить КПД устройств.

Принцип автобалластного регулирования заключается в параллельном подключении к полезной нагрузке станции одинаковой по величине дополнительной (балластной) нагрузки (БН) через регулятор (рис.2). Изменение величины полезной нагрузки (ПН) влечет за собой изменение величины балластной за счет регулятора и суммарная нагрузка генератора остается неизменной.

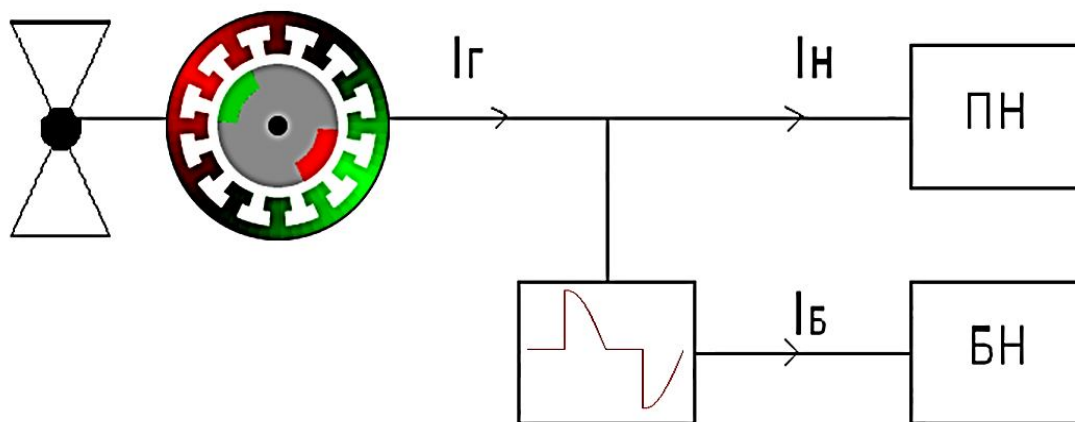


Рис. 2. Регулирование балластной нагрузки автономной микроГЭС



В качестве регулятора используются тиристорные коммутаторы. Трехфазные тиристорные коммутаторы выполняются в виде симметричных биполярных тиристорных ячеек. Работа тиристорной ячейки с нулевым проводом не отличается от работы однофазного варианта. Поэтому его использование упрощает построение математической модели работы регулятора.

Анализ работы тиристорного регулятора с использованием метода гармонического анализа позволил выявить закономерности в искажении выходных электрических параметров, оно растет с увеличением угла управления тиристорами (коэффициент искажения может достичь 100 %). Из полученных характеристик следует то, что можно добиться получения оптимальных значений выходных параметров если изменять углы управления тиристорами в диапазоне от 30 до 90 градусов.

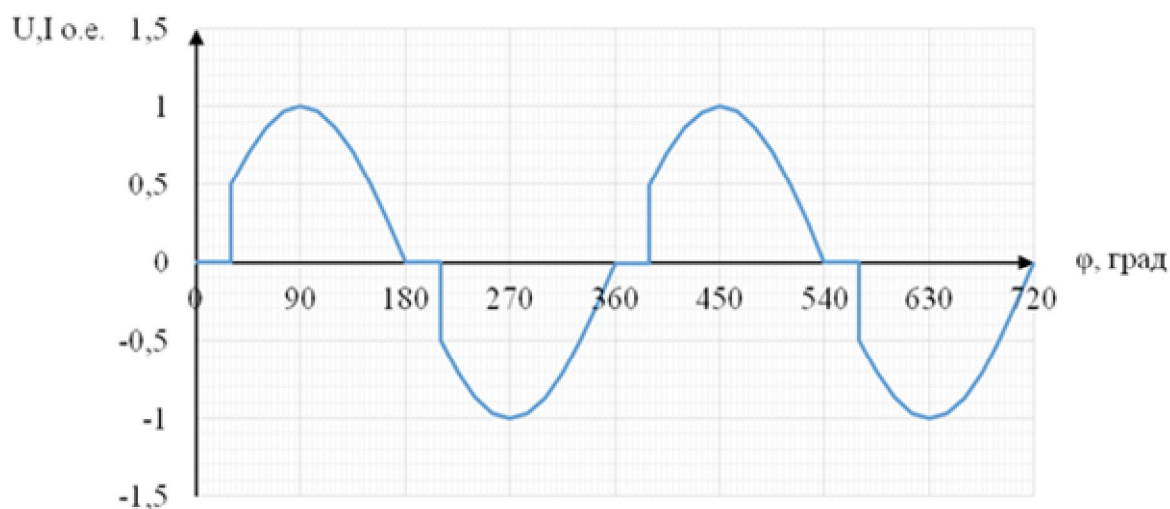


Рис. 3. Зависимость тока и напряжения при угле управления 30 град

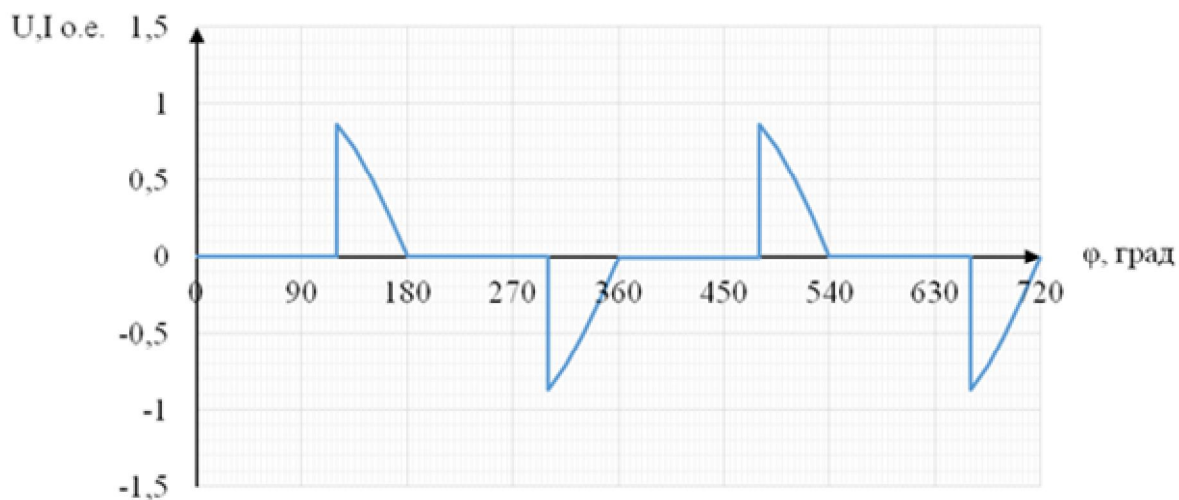
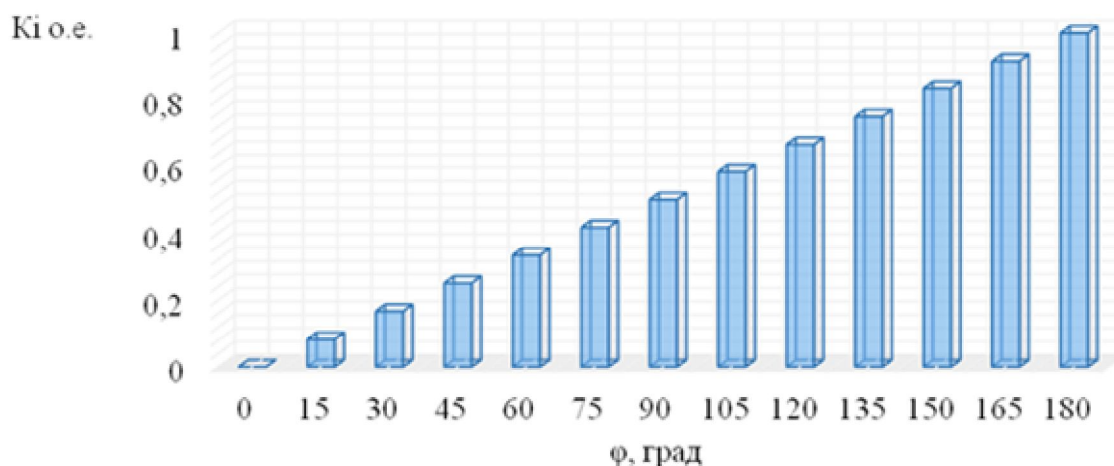


Рис. 4. Зависимость тока и напряжения при угле управления 120 град



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента искажения от угла управления

Для модернизации блока управления тиристорным регулятором балластной нагрузки используется микропроцессорное устройство, которое будет изменять угол управления тиристорами. Алгоритм работы программируется в микропроцессор с помощью среды программирования Code Composer Studio (CCS).

Практическая значимость работы.

Использование микропроцессора внесет положительный вклад в управление микроГЭС за счет введения системы обратной связи. При этом будет обеспечиваться не аппаратная, а программная реализация систем управления, что значительно расширит функциональные возможности, улучшит характеристики энергосистемы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение : учеб. пособие / Ю. В. Подураев. – Москва: Машиностроение, 2007. – 256 с.: ил.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Мехатроника>
3. <http://www.yaskawa.com/site/products.nsf/staticPagesNewWindow/mechatronics.html>
4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
5. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Выбор способа регулирования микрогидроэлектростанций с автобалластной нагрузкой // Гидротехническое строительство. – 1990. – № 7. – С. 33–35.
6. Alp.Partnun, St.Antonien. МикроГЭС. Hassler Erwin, Elektrotechnik, Schweiz, 1985, 36, № 12, p 49-51.
7. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Механические и электромеханические характеристики автоматизированных электроприводов. Ч1. Учебное пособие/ Изд-во ТПУ, 2004. – 123 с.
8. Каракулов А.С., Аксенов Д.С., Арещенко Б.В, Саидов В.С. Разработка программного обеспечения для систем управления электрическими двигателями. Учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во ТУСУР, 2007 г., 261 с.
9. Yu Nomokonova and E Bogdanov 2014 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 66 012016.

## ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КАПИЛЛЯРНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Леонтьев А.М., Айгузина В.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Проведение неразрушающего контроля (НК) деталей и узлов авиационной техники является необходимым и обязательным условием обеспечения качества изделий и их безопасной эксплуатации. Капиллярным методом контролируются такие детали авиационной техники, как: рабочие лопатки, диски тяговых двигателей и компрессоров, силовые шпангоуты, стрингеры, лонжероны, лопасти воздушных винтов самолетов и вертолетов, стойки и колеса шасси и др. Контроль качества сварных соединений имеет ключевое значение для получения достоверных сведений о возможности эффективной и безопасной эксплуатации металлоконструкций несущего, транспортного, емкостного и прочего функционального назначения, а также конструкций, выполненных из пластиков и полиэтиленов.

Целью работы является исследование отечественных средств реализации капиллярного метода неразрушающего контроля элементов авиационной техники.

Капиллярный метод НК основан на проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного рисунка (цветного, люминесцентного, контрастного). Достоинства метода: высокие чувствительность, разрешающая способность и достоверность контроля; наглядность результатов контроля; получение четких, длительно сохраняющихся рисунков дефектов; возможность контроля деталей разной степени сложности; возможность контроля в один прием широких зон деталей; широкий спектр контролируемых материалов; высокая производительность при поточном контроле.

Анализ средств реализации капиллярного метода показал, что одной из основных его разновидностей является люминесцентная дефектоскопия, при которой используется способность некоторых веществ (люминофоров) светиться видимым светом под действием ультрафиолетового излучения. Преимущество данного метода заключается в большой чувствительности, позволяющей выявлять дефекты раскрытием более 0,1 мкм, так как все используемые вещества обладают высокой проникающей способностью.

Известны зарубежные материалы для люминесцентной дефектоскопии в аэрокосмической, автомобильной, атомной, нефтехимической промышленности, а также сварки, металлургии и для контроля особо опасных объектов – пенетранты фирм: *HELLING*; *MAGNAFLUX* (для контрастных пенетрантов «*SPOTCHECK*» и для флуоресцентных пенетрантов «*ZYGLO*»); *SHERWIN*; *ELYCHEMICAL Company Ltd.* (контрастные «*Checkmor*» и люминесцентные «*Britemor*» пенетрантные системы), *CHEMETALL OAKITE (ARDROX)*, *MET-L-Check Company* и др. – приведены в таблице 1. [1]. Продукция фирм сертифицирована по военным стандартам M11-1-25135E (AMS 2644).

Их достоинства: высокие качество, проникающая способность и экономичность, низкая токсичность, относительно невысокая стоимость (от 800 рублей за один литр), соответствие международным стандартам (подтверждено заключениями ЦНИИ КМ «Прометей», ОАО «НИКИМТ–Атомстрой»). Наборы *Sherwin* приспособлены для Российского климата, для трех температурных диапазонов (стандартный диапазон от +10°C до +50°C).

**Таблица 1. Зарубежные средства люминесцентной дефектоскопии**

Тип пенетранта	Контролируемый материал	Экологичность, пожаробезопасность	Стоимость	Класс чувствительности
HELLING	металл керамика (пластмасса)	не токсичен пожаробезопасен	от 1000 рублей за один литр	I-III
MAGNAFLUX	металл керамика (пластмасса)	не токсичен пожаробезопасен	от 800 рублей за один литр	I-III
SHERWIN	металл керамика пластмасса	не токсичен пожаробезопасен	от 1100 рублей за один литр	II

Отечественные средства реализации люминесцентной дефектоскопии, производства фирм ЛЮМ-1; АЭРО-12 А; ООО «ХлоренХима» приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Отечественные средства реализации люминесцентной дефектоскопии**

Тип пенетранта	Контролируемый материал	Экологичность, пожаробезопасность	Стоимость	Класс чувствительности
ЛЖ-4	металл керамика пластмасса	токсичен огнеопасен	от 250 руб. за кг.	II
ЛЖ-6а	металл керамика	токсичен огнеопасен	от 250 руб. за кг.	I
ЛЖТ	металл керамика	не токсичен пожаробезопасный	от 250 руб. за кг.	I-IV
АЭРО-12 А	металл	огнеопасен		I, II

**Таблица 3. Классы чувствительности капиллярного контроля**

Класс чувствительности	Минимальная ширина раскрытия выявляемых несплошностей при использовании заданного набора дефектоскопических материалов, мкм
I	менее 1
II	1 – 10
III	10 – 100
IV	100 – 500
технологический	не нормируется

Установлено, что технические характеристики дефектоскопических материалов ведущих фирм Евросоюза и США практически одинаковы. Отдельные преимущества связаны с температурным диапазоном и некоторыми другими специфическими требованиями. В условиях рыночной экономики составы дефектоскопических материалов, в первую очередь импортных, публикуются редко.

Авторами рекомендуется для замены зарубежных пенетрантов фирм *Helling*, *Magnaflux*, *Sherwin* использовать пенетрант ЛЖТ, который соответствует третьему уровню чувствительности по [2] и четвертому по [3] и не уступает по чувствительности лучшим зарубежным аналогам, а диапазону изменения ширины раскрытия выявляемых несплошностей превосходит их.

В заключение отметим основные преимущества применения отечественных пенетрантов для реализации капиллярной дефектоскопии: высокое качество, соответствующее отечественным и международным стандартам; выгодные цены и сроки поставки благодаря складам в России; минимизация транспортных, логистических и таможенных налогов; возможность расширения производства отечественных пенетрантов. При этом перспективны работы по повышению экологичности отечественных пенетрантов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://isp.viam.ru>
2. СТБ-1172-99. Контроль неразрушающий. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Основные положения. Минск. – 26 с.
3. EN 471-1. Principles and guidance covering agreements for the management of border sections. – 31 с.
4. <http://www.ntcexpert.ru/>
5. <http://www.hloren.ru/>
6. <http://ndt-testing.ru/>

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВЕНТИЛЯТОРОВ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Поляков А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В настоящее время наиболее удобным видом передачи энергии является электричество, в связи с чем электроприводы получили широкое распространение. В частности, электровентильаторы широко применяются во многих областях деятельности человека, в том числе и для обеспечения работы автономных объектов. Ремонт такого рода оборудования если и подразумевается, то через достаточно длительные промежутки времени. Это является основной причиной повышенных требований к надежности работы при воздействии множества неблагоприятных факторов.

Достаточно долго для таких целей использовались нерегулируемые электроприводы, но, в последнее время, все чаще и чаще их заменяют регулируемые варианты. Самым существенным выигрышем от этого является использование оборудования в нескольких режимах работы (например, если иногда необходимо уменьшать энергопотребление системы). Но вместе с тем, регулируемый электропривод подразумевает в своем составе полноценный преобразователь частоты в отличие от нерегулируемых, которые подключаются к сети через обычный контактор.

В процессе работы преобразователя происходит его разогрев, что уменьшает срок службы входящих в него компонентов. В частности, наиболее критичными в этом плане элементами являются электролитические конденсаторы. Как показано в [1], матричные преобразователи характеризуются их отсутствием в силовой части, что, помимо всего прочего, позволяет уменьшить габариты всего изделия.

В зарубежной литературе [2] описаны несколько типов матричных преобразователей (МП), но наиболее простыми в управлении являются два – прямой (direct matrix converter) и непрямой (indirect matrix converter). Структурная схема непрямого МП показана на рисунке 1.

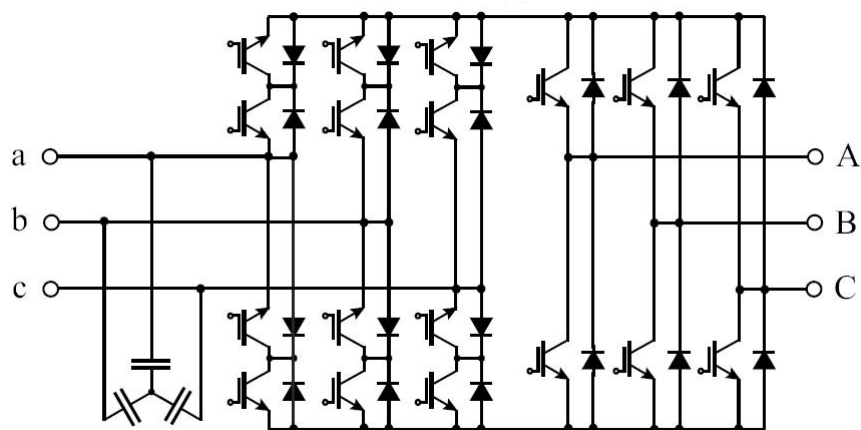


Рис. 1. Структурная схема непрямого матричного преобразователя

На входе располагается инвертор, состоящий из двунаправленных ключей, каждый из которых представляет собой два встречно включенных IGBT, зашунтированных диодами. Используется он для формирования постоянного напряжения, при этом напряжение может динамически меняться. Выходной инвертор работает независимо от входного и преобразует постоянное напряжение в переменное необходимой частоты. В целом такая структура позволяет осуществлять обмен энергией нагрузки с сетью при достаточно малых габаритах. Для обеспечения условия непрерывности токов используют синусные фильтры на входе и выходе (при использовании синхронного двигателя). При всех своих достоинствах, не прямой МП проигрывает по энергетике преобразователям с активным выходным выпрямителем и батареей конденсаторов.

Прототипом прямых МП являются непосредственные преобразователи частоты на тиристорах, получившие название преобразователей частоты с непосредственной связью. Применение такого рода преобразователей ограничивалось низкой устойчивостью тиристоров к помехам и необходимостью использования источника питания повышенной частоты.

В современных прямых матричных преобразователях (рис.2) используются двунаправленные ключи, каждый из которых представляет собой два встречно включенных IGBT, зашунтированных диодами. Всего их 9, и они позволяют подключать любую из фаз входного напряжения к фазам нагрузки.

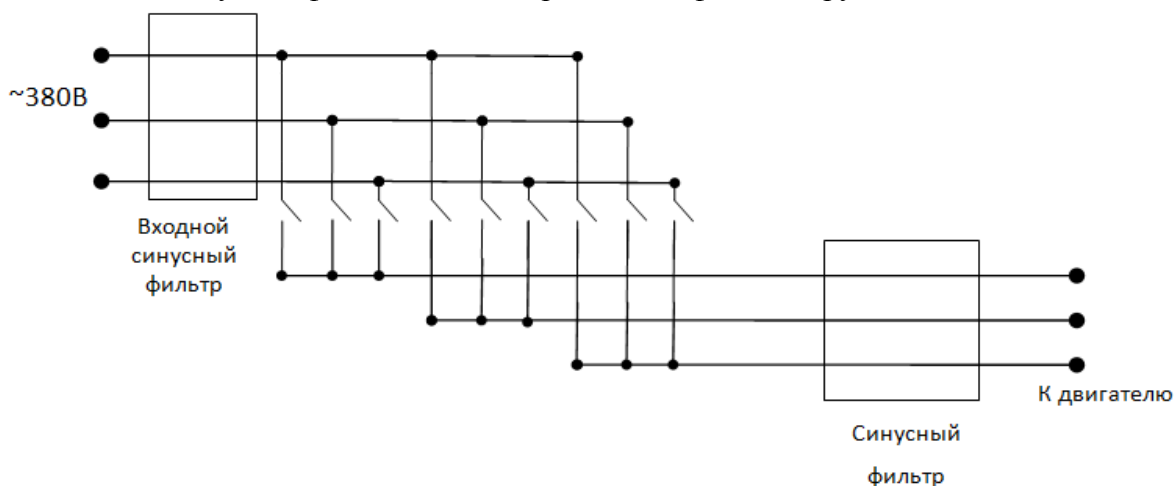


Рис. 2. Структурная схема прямого матричного преобразователя

Так же как и в случае непрямого МП, высокая частота коммутации ключей предполагает использование входных и выходных синусных фильтров. Тем не менее, для ограничения возможных выбросов напряжения на ключах используют демпфирующие схемы.

Такая структура позволяет создавать ток необходимой формы на выходе при сохранении синусоидальной формы входного тока и единичного коэффициента мощности. Возможность этого доказана в [3] - там показан векторный способ управления прямым МП. Этот метод управления является наиболее перспективным, поскольку его можно реализовать без использования длительных расчетов. Тем не менее, управление прямыми матричными преобразователями намного сложнее, чем преобразователями других типов, так что отсутствие мощных микроконтроллеров являлось основным тормозом их развития.

Вообще, в мире активное развитие матричных преобразователей началось в последние 10-15 лет, когда появились высокопроизводительные процессоры и технология производства IGBT-модулей с низким падением.

Автономный режим работы электроклапанов подразумевает использование элементной базы производства СНГ, поскольку партнеры из остальных государств не могут обеспечить гарантированную поставку. К счастью, микроконтроллеры достаточной мощности уже освоены в России.

Вентиляторная нагрузка характеризуется постоянно возрастающей зависимостью мощности от частоты вращения и длительными режимами работы в одном и том же режиме. Это означает, что переходные режимы относительно редки, и мало влияют на нагрев преобразователя. В случае непрямого МП для соединения входных и выходных цепей используется последовательное соединение трех полупроводниковых элементов, а для прямого МП – двух, из-за чего тепловые потери в первом случае выше.

Так как воздух не является плотной средой, а вентилятор обладает значительным моментом инерции, невозможно резкое изменение нагрузки в безаварийном режиме работы. Из этого следует, что нет острой необходимости использовать быстродействующие аналоговые датчики тока, производство которых отсутствует в странах СНГ.

Единственным элементом, отсутствие которого серьезно тормозит использование матричных преобразователей для вентиляторов автономных объектов, является двусторонний ключ, выполненный в едином модуле. Но, учитывая, что в последние годы освоение производства IGBT-модулей идет быстрыми темпами, можно ожидать появление двусторонних ключей российского производства.

В мире уже появились так называемые RB-IGBT (reverse blocking IGBT), которые объединяют в единой структуре IGBT и диод, но при этом обладают меньшим падением (3В против 4В в обычном двустороннем ключе). Это позволит существенно увеличить КПД матричных преобразователей, что еще сильнее ускорит развитие этой области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Климов В.П. Современные направления развития силовых преобразователей переменного тока. Режим доступа: <http://www.tensy.ru/article13.html>
2. T. Friedli. A High Efficiency Indirect Matrix Converter Utilizing RB-IGBTs. Режим доступа: [https://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/friedli\\_PESC06.pdf](https://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/friedli_PESC06.pdf)
3. D. Casadei, G. Grandi. Векторное управление матричным преобразователем с коэффициентом мощности, равным единице. Портал магистров ДонНТУ, режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2011/etf/kostrubina/library/translate/translate.htm>

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАНГЕНСАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Вавилов В.Е., Якупов А.М, Бекузин В.И.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

При расчете параметров магнитного поля электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ), возникают сложности в точном определении тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности ВПМ.

Введем понятия коэффициента пропорциональности между коэрцитивной силой ВПМ, остаточной индукцией ВПМ и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ВПМ.

Так как магнитное поле на поверхности ВПМ зависит от энергетических параметров ВПМ, то тангенциальная составляющая магнитного поля на поверхности ВПМ могут быть описаны в виде:

$$H_{\varphi}(r, \varphi, z) = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_0} \sin \varphi \quad (1)$$

где  $k_{\varphi}$  – коэффициент пропорциональности между коэрцитивной силой ВПМ и остаточной индукцией ВПМ и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ВПМ;  $J$  – намагниченность ВПМ;

Коэффициент пропорциональности между коэрцитивной силой ВПМ и остаточной индукцией ВПМ и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ВПМ характеризует зависимость тангенциальной составляющей напряженности на поверхности ВПМ от его геометрических параметров (толщины, длины и диаметра). Поэтому важной задачей при разработке многодисциплинарной математической модели ЭМПЭ с ВПМ является максимально точное определение данного коэффициента.

Для решения данной задачи может быть использована трехмерная модель магнитного поля создаваемого ВПМ в цилиндрических координатах предложенная *H.L.Rakotoarison* [1] и верифицированная в работах [2]. Для тангенциальной составляющей данная модель представляется в виде:

$$H_{\varphi}(r, \varphi, z) = \frac{J}{4\pi\mu_0} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \left[ \frac{-r'_i(z-z'_i)(r'_i \sin \alpha)}{((r-r'_i \cos \alpha)^2 + (r'_i \sin \alpha)^2)G(\alpha)} - \cos(\alpha) \arctan \left[ \frac{(z-z'_i)(r-r'_i \cos \alpha)}{r'_i \sin \alpha \cdot G(\alpha)} \right] - \sin(\alpha) \ln [G(\alpha) - (z-z')] \right] d\varphi' \quad (2)$$

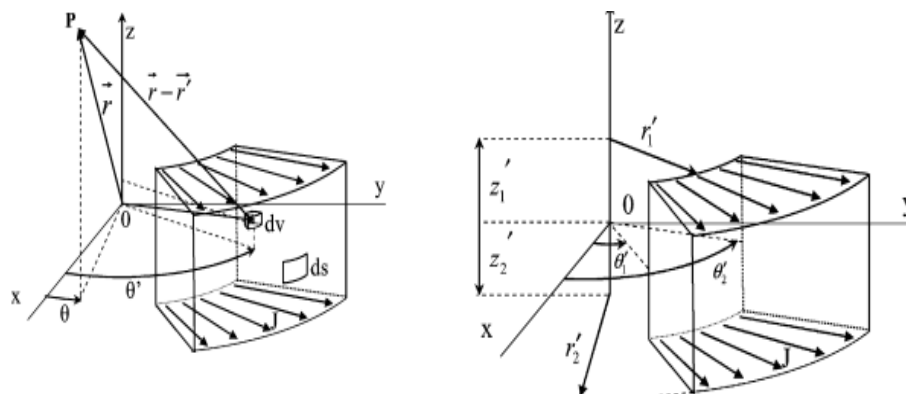
где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $z, z'_i, r, r'_i, \varphi_1, \varphi_2$  – геометрические размеры ВПМ, рис. 1;  $\alpha = \varphi - \varphi'$ ;  $G(\alpha) = \sqrt{(r-r'_i \cos \alpha)^2 + (r'_i \sin \alpha)^2 + (z-z'_i)^2}$ .

В результате получаем:

$$k_{\varphi} \sin \varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \left[ \frac{-r'_i(z-z'_i)(r'_i \sin \alpha)}{((r-r'_i \cos \alpha)^2 + (r'_i \sin \alpha)^2)G(\alpha)} - \cos(\alpha) \arctan \left[ \frac{(z-z'_i)(r'_i - r \cos \alpha)}{r'_i \sin \alpha \cdot G(\alpha)} \right] - \sin(\alpha) \ln [G(\alpha) - (z-z')] \right] d\varphi' \quad (3)$$

где  $r_2 = R_{\text{ВПМ1}}$ ;  $r_1 = R_{\text{сп}}$ ;  $z_i$  – осевая координата на поверхности ВПМ.

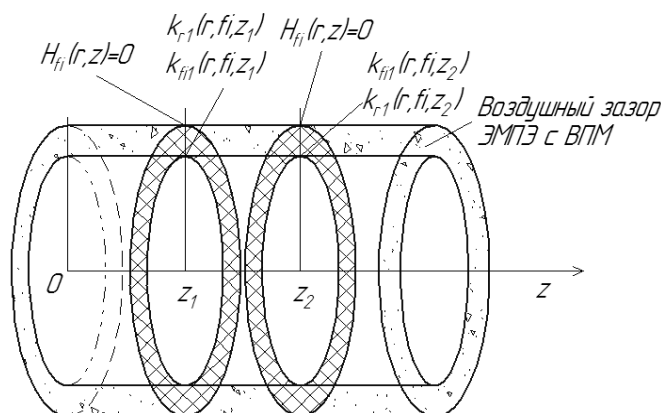




**Рис. 1.** К расчету трехмерного магнитного поля ВПМ (модель предложенная *H. L. Rakotoarison*)

Аналитическое решение выражений (3), представляет значительные сложности, но в тоже время при задании определенных численных параметров и использовании специализированных программных пакетов решение (3) может быть найдено с достаточной точностью для любых геометрических параметров ВПМ.

Кроме того, присутствие в (3) координаты  $z$  позволяет рассчитывать тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля ВПМ для любой точки объема воздушного зазора в различных сечениях, рис. 2, а следовательно, получать полную картину электромагнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ не только по тангенциальной координате, но и по осевой длине воздушного зазора.



**Рис. 2.** К расчету трехмерного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ

Согласно параметрам генератора запишем его геометрические параметры на основании (3):

Упростим  $G(\alpha)$

$$G(\alpha) = \sqrt{(r - r'_i \cos \varphi')^2 + (r'_i \sin \varphi')^2 + (z - z'_j)^2} = \sqrt{r^2 - 2rr'_i \cos \varphi' + r_i'^2 + (z - z_j)^2} \quad (4)$$

Представим подынтегральное выражение в виде (5)

$$\int_{\varphi'_1}^{\varphi'_2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} F_{ij} d\varphi' = \int_{\varphi'_1}^{\varphi'_2} (F_{11} - F_{12} - F_{21} + F_{22}) d\varphi' \quad (5)$$

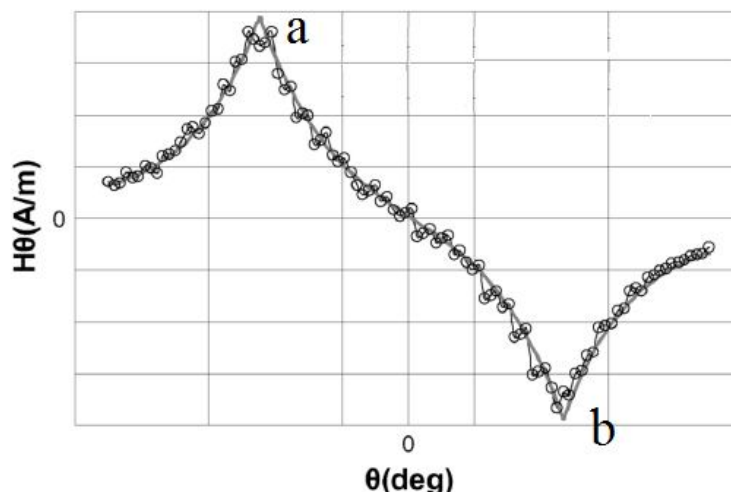
$$\begin{aligned}
 F_{11} = & \frac{-r_1'(z-z_1')(r_1'\sin(\alpha))}{(r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2)\sqrt{r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2+(z-z_1')^2}} - \\
 & -\cos(\alpha)\arctan\left[\frac{(z-z_1')(r_1'-r\cos\alpha)}{r\sin\alpha\sqrt{r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2+(z-z_1')^2}}\right] - \\
 & -\sin(\alpha)\ln\left[\sqrt{r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2+(z-z_1')^2}-(z-z_1')\right]d\varphi'
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 F_{12} = & \frac{-r_1'(z-z_1')(r_1'\sin(\alpha))}{(r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2)\sqrt{r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2+(z-z_2')^2}} - \\
 & -\cos(\alpha)\arctan\left[\frac{(z-z_1')(r_1'-r\cos\alpha)}{r\sin\alpha\sqrt{r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2+(z-z_2')^2}}\right] - \\
 & -\sin(\alpha)\ln\left[\sqrt{r^2-2rr_1'\cos\alpha+r_1'^2+(z-z_2')^2}-(z-z_1')\right]d\varphi'
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 F_{21} = & \frac{-r_2'(z-z_2')(r_2'\sin(\alpha))}{(r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2)\sqrt{r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2+(z-z_1')^2}} - \\
 & -\cos(\alpha)\arctan\left[\frac{(z-z_2')(r_2'-r\cos\alpha)}{r\sin\alpha\sqrt{r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2+(z-z_1')^2}}\right] - \\
 & -\sin(\alpha)\ln\left[\sqrt{r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2+(z-z_1')^2}-(z-z_2')\right]d\varphi'
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 F_{22} = & \frac{-r_2'(z-z_2')(r_2'\sin(\alpha))}{(r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2)\sqrt{r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2+(z-z_2')^2}} - \\
 & -\cos(\alpha)\arctan\left[\frac{(z-z_2')(r_2'-r\cos\alpha)}{r\sin\alpha\sqrt{r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2+(z-z_2')^2}}\right] - \\
 & -\sin(\alpha)\ln\left[\sqrt{r^2-2rr_2'\cos\alpha+r_2'^2+(z-z_2')^2}-(z-z_2')\right]d\varphi'
 \end{aligned} \tag{9}$$

Для упрощения интегрирования принимаем  $z=0$ , после интегрирования следует задаться определенным радиусом ( $r=const, r_1'<r<r_2'$ ) и область по углу  $\varphi\in[-\varphi/2p; \varphi/2p]$ . После интегрирования получаем качественную кривую.



**Рис. 3.** Зависимость напряженности магнитного поля от угла

Стоит отметить, что в точках а,б знаменатель обращается в ноль.

Таким образом, может быть сформулирована многодисциплинарная математическая модель ЭМПЭ с ВПМ описывающая магнитное поле в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ с учетом взаимовлияния тепловых и электромагнитных полей, и механических нагрузок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. H. L. Rakotoarison, J.-P. Yonnet, and B. Delinchant, Using Coulombian Approach for Modeling Scalar Potential and Magnetic Field of a Permanent Magnet With Radial Polarization, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 4, APRIL 2007
2. R. Ravaud, G. Lemarquand, V. Lemarquand and C. Depollier, Magnetic field produced by a tile permanent magnet whose polarization is both uniform and tangential, Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 13, 1–20, 2009.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КАБЕЛЕЙ К СТАРЕНИЮ В УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Матери Т.М., Ким В.С., Стариков А.Н. \*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

\*ООО «Томсккабель», г. Томск

Низковольтные кабельные изделия (КИ) эксплуатируются в условиях, когда оболочка и изоляция подвергаются одновременному воздействию многих факторов, включая действие агрессивных сред, среди которых на производстве и транспорте наиболее часто встречаются жидкие углеводороды: дизельное топливо, трансформаторное масло. В большой степени срок службы КИ зависит от способности противостоять действию этих факторов и определяется сроком службы самого слабого материала в конструкции, которым является полимерный материал изоляции и/или оболочки [1].

Данная работа позволит определить критические параметры устойчивости КИ к агрессивной среде и разработать модифицированную конструкцию кабеля с повышенной устойчивостью к воздействию агрессивной среды. Это даст производителям КИ надежные критерии выбора материалов и обеспечит надежную

работу широкой номенклатуры низковольтных КИ в течение более длительного времени на транспорте и во многих ответственных отраслях производства[2].

В данной работе проведено сравнение устойчивости маслостойких проводов отечественного производства с маслостойкими кабелями марки Ölflex фирмы LAPP Cable (Германия) в среде дизельного топлива и трансформаторного масла.

Провод отечественного производства на напряжение 660В состоит из 1 многопроволочной жилы сечением 4 мм<sup>2</sup> с изоляцией из уретанового ТЭП, оболочкой из полиолефинового термоэластопласта.

Кабель гибкий марки Ölflex 500P на напряжение 450 В имеет 3 многопроволочные жилы сечением 1.0 мм<sup>2</sup> с изоляцией из полиуретана. Поверх скрученных изолированных жил наложена оболочка из полиуретана. Рабочая температура от -40 °С до +80°С.

Кабель управления марки Ölflex 440P на напряжение 450 В состоит из 2 многопроволочных жил сечением 1.0 мм<sup>2</sup> с изоляцией из полиолефинового ТЭП. Оболочка кабеля выполнена из полиуретана. Рабочая температура от -40°С до +80°С.

Кабель силовой гибкий марки Ölflex ROBUST 200 на напряжение 660В состоит из 2 многопроволочных жил сечением 1.0 мм<sup>2</sup> с изоляцией из полиолефинового ТЭП. Поверх скрученных изолированных жил наложена оболочка из полиолефинового ТЭП. Рабочая температура от -40°С до +80°С.

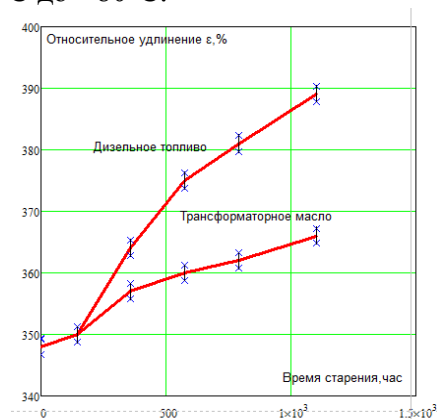


Рис. 1. Относительное удлинение при разрыве оболочки КИ, %

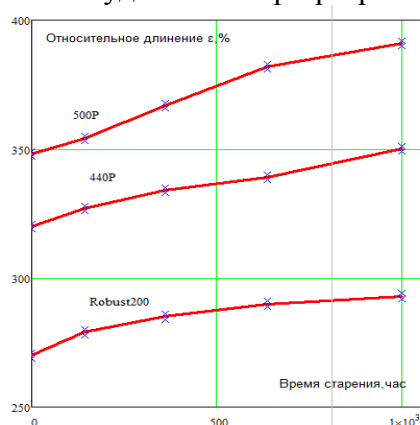


Рис. 2. Относительное удлинение при разрыве оболочки при воздействии трансформаторного масла КИ, %

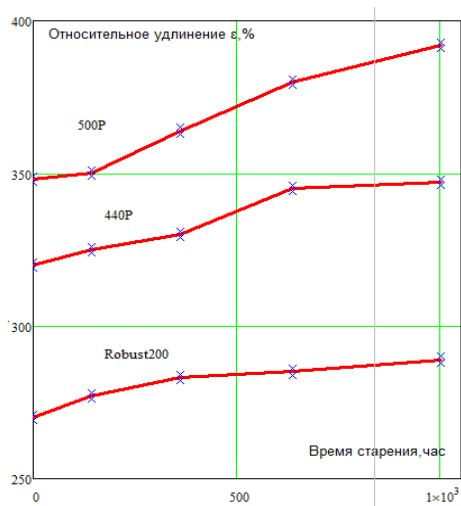


Рис. 3. Относительное удлинение при разрыве оболочки при воздействии дизельного топлива КИ, %

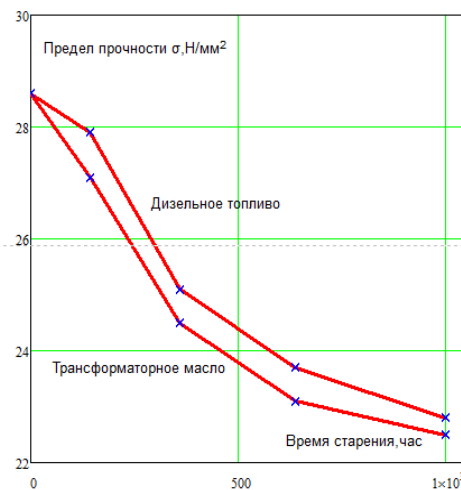


Рис. 4. Предел прочности оболочки отечественного провода при разрыве, Н/мм<sup>2</sup>

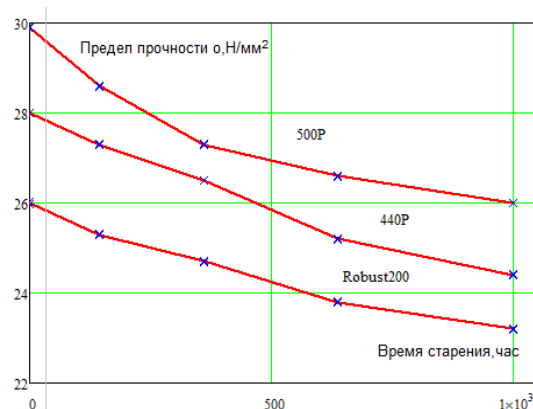
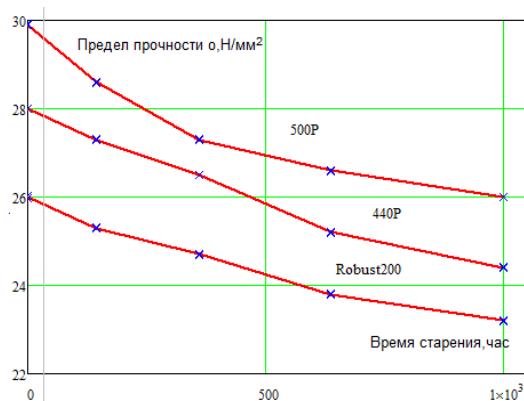


Рис. 5. Предел прочности оболочки отечественного провода при разрыве в среде дизельного топлива, Н/мм<sup>2</sup>



**Рис. 6.** Предел прочности оболочки отечественного провода при разрыве в среде трансформаторного масла, Н/мм<sup>2</sup>

1. Для всех образцов кабельных изделий, с оболочкой, выполненной из уретанового ТЭП, изменение толщины оболочки при воздействии дизельного топлива составило от 8.3...12.5%, при воздействии трансформаторного масла от 5.8...9.4%. Изменение относительного удлинения при нахождении в дизельном топливе составило от 9.3...12.6%, в трансформаторном масле от 5.1...12.3%. Изменение предела прочности в дизельном топливе составило 12.8...21.3%, в трансформаторном масле от 10.3...20.2%.

2. Для образцов кабельного изделия, выполненного из олефинового ТЭП, изменение толщины оболочки при воздействии дизельного топлива составило 11.8 %, при воздействии трансформаторного масла от 9.1%. Изменение относительного удлинения при нахождении в дизельном топливе составило 8.5 %, в трансформаторном масле 7.5%. Изменение предела прочности в дизельном топливе составило 10.7%, в трансформаторном масле 7 %.

В целом, можно сделать вывод, что уретановые и олефиновые термоэластопласты устойчивы к воздействию углеводородных жидкостей. Оба типа материала демонстрируют одинаково высокую устойчивость свойств с течением времени. Таким образом, олефиновые и уретановые ТЭП являются хорошими материалами для производства изоляции и оболочки маслобензостойких кабелей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев И.И. Кабельные изделия: Справочник – 2-е изд., перераб.и доп. М.: Высшая школа, 2004. - 230с.
2. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. = М.: Химия, 1982. - 244с.

#### РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА МАМДАНИ НА ATSAM 3N4C

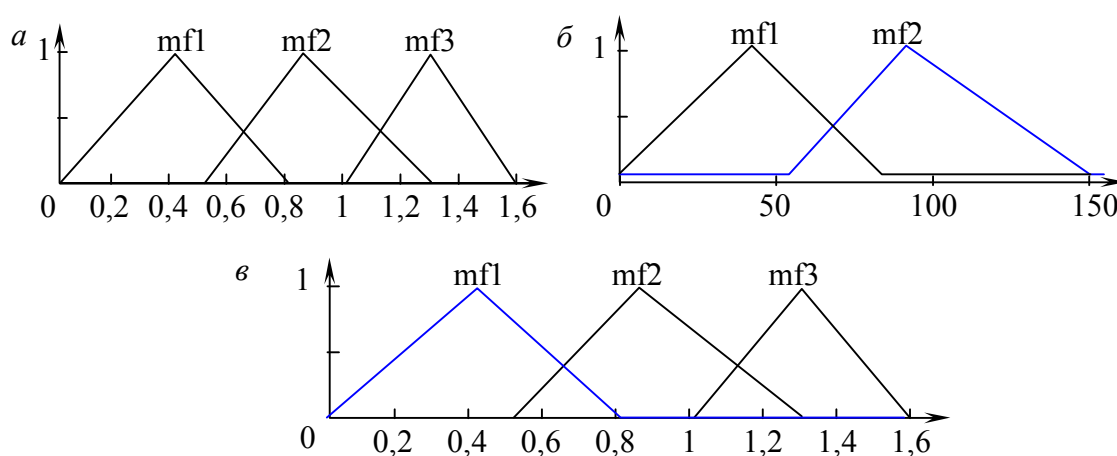
Шуленков Р.А., Другак А.В.

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

В современные системах управления (САУ) широко внедряются fuzzy (нечеткие) регуляторы. Fuzzy регулятор реализуется на основе одного из следующих алгоритмов: Мамдани, Такаги - Сугено, Цукамото и Ларсена [1]. Наибольшее распространение получил алгоритм Мамдани. В алгоритме нечеткого вывода Мамдани основными этапами являются: формирование базы правил (рис. 1), фаззификация входных

переменных, агрегирование подусловий в нечетких правилах, активизация подзаключений и аккумуляция (композиция) заключений нечетких правил и дефаззификация (рисунок 2). Для начала сформируем набор функций принадлежности для САУ (системы автоматического управления). Эксперт формирует входные и выходные функции принадлежности входного и выходного множества.

Первый этап в разработке Fuzzy – контроллера на основе алгоритма Мамдани является формирование базовых функций принадлежности: «Л» - функция, трапецидальная и другие функции (рис.1 – 2). Для предварительного тестирования будем использовать Qt платформу, в последующем код программы будет положен на ARM (ATSAM3N4C) отладочную плату Atmel SAM3N – EK с использованием операционной системы реального времени FreeRTOS. Данный микроконтроллер программируется с помощью Atmel Studio 6.1 с использованием JTAG программатора segger g-link.



**Рис. 1.** Формирование функций принадлежности множества входных значений А (а), В (б), С (в)

Вторым этапом является разработка функции фаззификация входных переменных по построенным функциям принадлежности («Л» - функциям). Фаззификация это сопоставление значений входных переменных значениям из нечеткого множества значений функции.

```
static void mapFirst(float value){ float map[3];
mapGlobalFirst[0] = map[0] = trinf(value, 5.0, 6.0, 10.0);
mapGlobalFirst[1] = map[1] = trinf(value, 7.0, 11.0, 15.0);
mapGlobalFirst[2] = map[2] = trinf(value, 12.0, 17.0, 18.0);
//qDebug() << map[0] << '\t' << map[1] << '\t' << map[2] << '\n';
return;}
static void mapSecond(float value){
float map[2];
mapGlobalSecond[0] = map[0] = trinf(value, 50.0, 60.0, 100.0);
mapGlobalSecond[1] = map[1] = trinf(value, 70.0, 110.0, 150.0);
//qDebug() << map[0] << '\t' << map[1] << '\n';
return;}
```

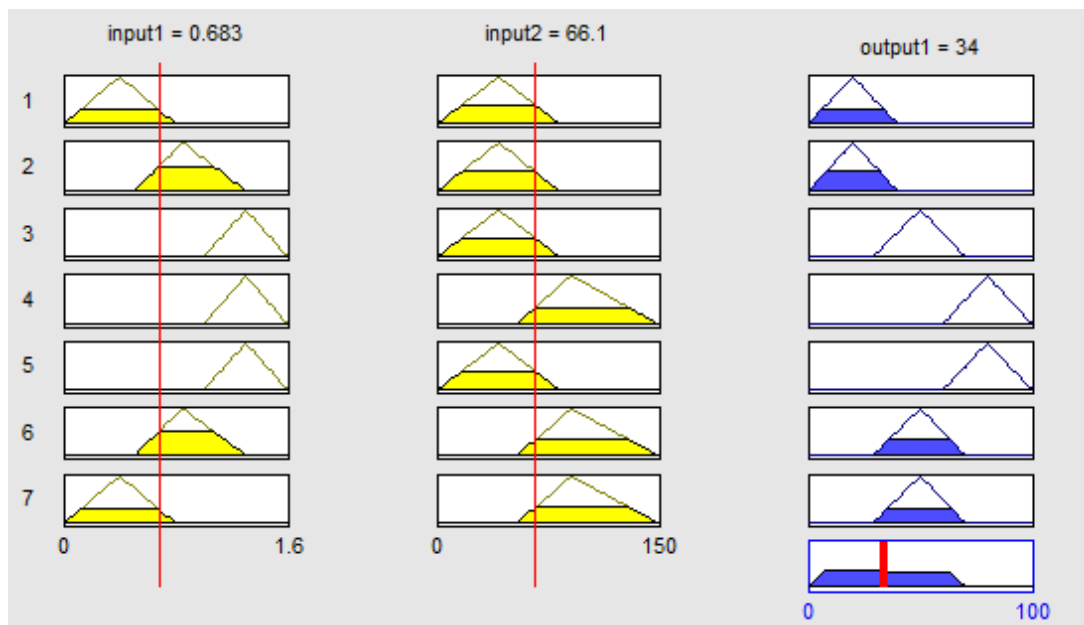


Рис. 2. Дефаззификация выходного управляющего воздействия

Для хранения данных по фаззификации используется один локальный массив `map[]` и два глобальных массива `mapGlobalFirst[]` и `mapGlobalSecond[]`, для работы с отсалными функциями программы (задачи).

Третьим этапом являться формирование правил на основе нечетких множеств, правила формируются «Экспертом», «Эксперт» - субъект, обладающий хорошими знаниями и уверенными навыками в данной области проведения эксперимента. Сформированные правила сопоставляют значения и выбираются значения в зависимости от условий: максимальное из значений или минимальное из значений функции принадлежности.

```
static float mapAnd(float valueFirst, float valueSecond){
    return valueFirst > valueSecond ? valueSecond : valueFirst;}
static float mapOr(float valueFirst, float valueSecond){
    return valueFirst < valueSecond ? valueSecond : valueFirst;}
static void MamdaniRule(void){
    mapRuleFirst[0] = mapRule[0] =
mapAnd(mapGlobalFirst[0], mapGlobalSecond[0]);
    //qDebug() << mapRuleFirst[0] << '\n';
    mapRuleSecond[0] = mapRule[1] = mapAnd(mapGlobalFirst[0], mapGlobalSecond[1]);
    //qDebug() << mapRuleSecond[0] << '\n';
    //mapRuleSecond[1] = mapRule[2] = mapAnd(mapGlobalFirst[1],
mapGlobalSecond[0]);
    //mapRuleSecond[2] = mapRule[3] = mapAnd(mapGlobalFirst[2],
mapGlobalSecond[0]);
    mapRuleThird[0] = mapRule[4] = mapAnd(mapGlobalFirst[2], mapGlobalSecond[1]);
    //qDebug() << mapRuleThird[0] << '\n'; return;}
```

На четвертом этапе происходит суммирование итоговых значений из набора условий для каждого из множеств функций принадлежности. Аккумуляция значений происходит в зависимости от данных полученных на третьем этапе выполнения задачи.



Пятый, итоговый, на этом этапе формирует управляющее значение воздействия на объект. Формирование, дефазификация, осуществляется методом «Центром гравитации».

$$u = \frac{\sum \mu_{C1} \cdot \sum D_1 + \sum \mu_{C2} \cdot \sum D_2 + \dots + \sum \mu_{CN} \cdot \sum D_N}{\sum \mu_{C1} + \sum \mu_{C2} + \dots + \sum \mu_{CN}}, \quad (1)$$

$u$  – управляющее воздействие;  $\mu$  – значение функции принадлежности;  $D$  – диапазон изменения нечеткого множества.

```
static float Defazzifikacia(void){ MamdaniRule();
float sum = 0.0; float temp = 0.0;
long j = 0; float i = 0;
for(i = 0.0, j = 0; i < 40.0; i += 0.1, j++){
    sum += i*mapRuleFirst[0]; }
temp += (float)j * mapRuleFirst[0];
for(i = 30.0, j = 0; i < 70.0; i += 0.1, j++){
    sum += i*mapRuleSecond[0]; }
temp += (float)j * mapRuleSecond[0];
for(i = 60.0, j = 0; i < 100.0; i += 0.1, j++){
    sum += i*mapRuleThird[0]; }
temp += (float)j * mapRuleThird[0];
//qDebug() << sum << '\n';
//qDebug() << temp << '\n';
if(temp < 0.01) return 0.0;
else return sum/temp;}
```

Теперь необходимо инициализировать работу внутреннего ADC, ADC 12 разрядный и необходимо создать задачу для работы в FreeRTOS. Для каждой задачи создается программный стек, где хранятся результаты работы задачи, присваивается приоритетности задачи, формируется название для диспетчера задач. Так же необходимо сформировать задачу, которая реализуют PWM управление для выходного (ых) PIN-а (ов).

Инициализация «железа» и конфигурация необходимых библиотек производится в ASF Wizard, первоначально задается размер стека, в заголовочных файлах задаются кванты работы задач в операционной системы реального времени. Затем создаются функции инициализации GPIO (для PWM) и инициализация ADC 12 bit.

После всей инициализации и формирования задач работы операционной системы для микроконтроллера запускается планировщик задач который обрабатывает задачу согласно преоритенности задачи и кванту времени на данную задачу.

Полученным Fuzzy – контроллер разработан на платформе ARM Atmel SAM3N4C с применением операционной системы реального времени FreeRTOS. Внедрение данного контроллера позволит повысить качество регулирования многих технологических процессов в АСУТП и повысить качество регулирования в аналогичных областях. Так же внедрение своей разработки позволит попасть под программу импорт — замещения.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОГРУЖНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Динь Конг Кюи

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В настоящее время наблюдается увеличение потребности использования телеуправляемых подводных аппаратов в целях повышения эффективности исследования и добычи минеральных ресурсов и проведения научных работ в океанах. Автономные системы электропитания (СЭП) телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА) перестают отвечать предъявляемым к ним требованиям и постепенно заменяются СЭП, обеспечиваемыми судном. Важнейшим звеном СЭП ТПА при передаче энергии на переменном токе по кабель-тросу является погружной трансформатор (ПТ). Он составляет основную часть массы и габаритов СЭП. Совершенствование ПТ повышает эффективность работы СЭП ТПА, в связи с чем выбор оптимальных параметров трансформатора является актуальной задачей [1, 2]. Решение задачи определения оптимальных параметров требует применения достоверных математических моделей описания физических (в том числе тепловых) процессов.

При анализе и расчете тепловых режимов трансформаторов на практике применяются поверочные, аналитические и численные методы.

В поверочных методах используются экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи от мощности элементов  $\alpha = f(P)$ , постоянной времени нагрева от массы элемента  $T = f(G)$  и превышения температуры обмоток от удельной поверхностной нагрузки  $\theta_{II} = f(q)$ . При заданной мощности элемента по одной или нескольким из указанных зависимостей можно определить электрические и конструктивные данные элемента при заданном температурном режиме. Основным недостатком этих методов является низкая точность тепловых расчетов, что ограничивает сферу их применения.

В тех случаях, когда необходимо рассматривать влияние различных факторов на распределение температуры в конструкции или исследуются тепловые режимы новых конструкций трансформаторов применяются аналитические методы [3].

Аналитический метод, основанный на сложении температурных полей и принципе суперпозиции температурных полей, позволяет получить приближенное аналитическое описание процессов теплоотдачи в трансформаторах [3, 4]. В результате расчета находятся температуры отдельных частей трансформатора. Погрешность метода составляет 15% [4].

Метод электротепловых аналогий использует формальную аналогию между процессами переноса тепла и электричества. В соответствии с этим методом распределенные тепловые параметры трансформатора заменяются сосредоточенными. Затем составляется схема замещения, эквивалентная в тепловом отношении реальной конструкции. Для схемы замещения можно составить систему алгебраических уравнений на основе законов Кирхгофа, решение которой позволяет установить связь между температурами, тепловыми потоками и тепловыми сопротивлениями для узловых точек схемы (катушки и сердечника). Погрешность метода уменьшается с увеличением числа узловых точек в эквивалентной тепловой схеме [3].

С появлением быстродействующих ЭВМ развитие получили численные методы расчета – методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). Они позволяют учитывать реальные, зависящие от температуры, свойства, рассматривать достаточно сложные по виду области расчета и выполнять расчеты без тех допущений,

которые принимались при исследовании полей аналитическими методами. Наиболее широкое применение МКР получил в расчетах стационарных и квазистационарных электромагнитных полей. Основным недостатком МКР является медленная сходимость и, как следствие, высокие затраты машинного времени. В последнее время наряду с МКР все чаще используется МКЭ. Кроме более точной аппроксимации геометрии и более точного описания изменения расчетных величин, МКЭ предоставляет следующие преимущества по сравнению с МКР [5]:

- рассматриваемая геометрия может быть любой, поскольку она определяется независимо от компьютерной программы;
- возможность определения расчетных параметров в любой точке рассматриваемой области;
- поскольку уравнения МКЭ решаются одновременно, существует возможность учесть все взаимодействия, имеющие место в системе, с высокой степенью гибкости и точности

Среди недостатков метода можно выделить следующие [5]:

время, необходимое для расчета, и требования к аппаратным средствам компьютера и объему носителей информации в несколько раз превышают аналогичные требования для МКР;

от пользователя требуется более глубокое понимание сущности данного метода.

На основе МКЭ сотрудниками компании ООО «Тор» разработана компьютерная программа ELCUT, которая представляет собой мощный современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов.

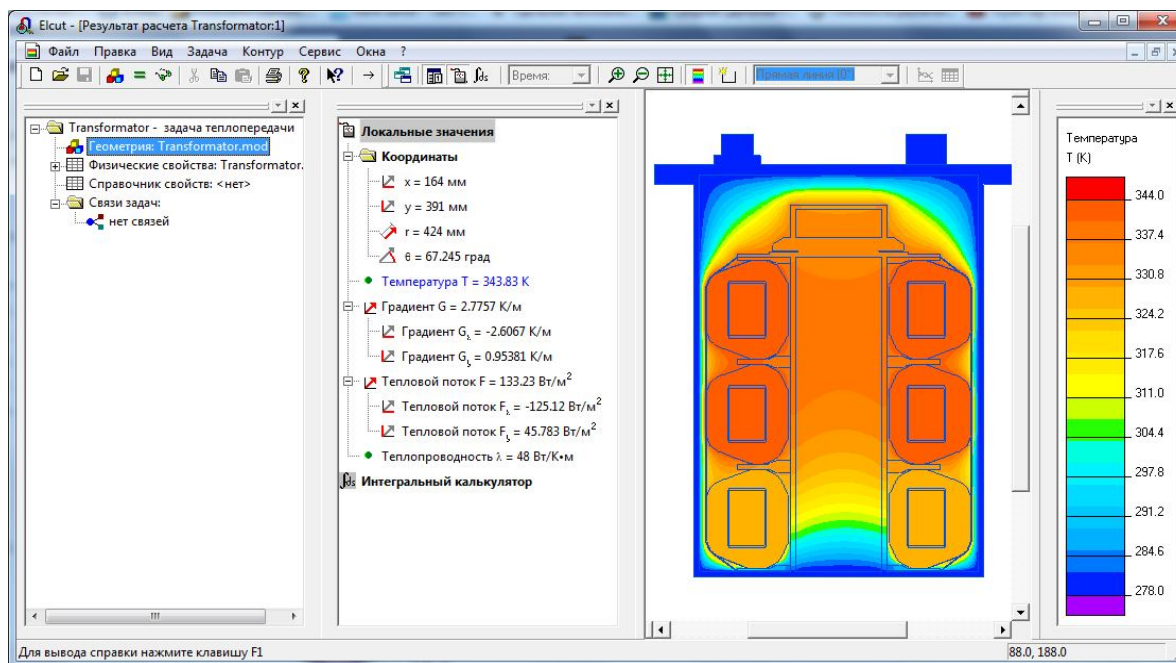


Рис. 1. Результат расчета температурных полей в ELCUT

Алгоритм решения температурных полей трансформатора заключается в следующем:

1. Выбор типа и класса решаемой задачи и настройка сетки. Выбирается тип задачи – температурное поле; класс задачи – осесимметричная. Шаги сетки по горизонтали и вертикали – 10мм.
2. Создание геометрической модели. Чертеж трансформатора выполнен в программе T-FLEX. После импорта чертежа в ELCUT необходимо его переработать, так как в программе ELCUT не воспринимаются кривые линии.
3. Ввод теплофизических коэффициентов материалов: теплопроводность, удельная теплоёмкость, плотность.
4. Расчет и ввод объема плотности тепловыделения обмоток и магнитопровода.
5. Расчет и ввод граничных условий: температуры границ, тепловой поток и коэффициент теплоотдачи.
6. Построение сетки конечных элементов.
7. Решение задачи, в результате которого получается картина распределения температурного поля – в любой точке известны значения температуры, градиента и теплового потока.

На рис. 1 представлена картина теплового поля погружного трансформатора тороидальной конструкции, полученная в результате расчета в программной среде ELCAD.

Заключение:

Анализ методов теплового расчета трансформаторов показал, что наиболее приемлемым методом при оптимизации параметров погружного трансформатора является метод конечных элементов.

Разработанная модель расчета теплового поля обеспечивает высокую точность расчета и может быть использована для решения задач оптимизации погружного трансформатора – выбора конструкции, материалов и геометрических размеров при заданных ограничениях для температур отдельных элементов..

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата большой энерговооруженности: автореф. дис. .... канд. техн. наук: 05.09.03 – Томск, 2006 – 20с.
2. Noirhomme, B., Cote, J. Evaluation of underground submersible distribution transformers through oil analysis // Electrical Insulation (ISEI) Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on. – 2012. – С. 217-222.
3. Белопольский, Е.И. Каретинкова, Л.Г. Пикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. 3-у изд., стереотипное. – М.: «ИД Альянс», 2008. – 400с.: ил.
4. Лукашенко С.В. Разработка математических моделей и алгоритмов тепловых расчетов при автоматизированном проектировании трансформаторов малой мощности: автореф. дис. .... канд. техн. наук: 05.09.01 – Оренбург, 1996 – 19с.
5. <http://msd.com.ua/ekstruzionnye-golovki-dlya-plastmass-i-reziny/sravnienie-metodov-konechnyx-raznostej-i-konechnyx-elementov/>

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С МАГНИТОПРОВОДОМ ИЗ АМОРФНОГО ЖЕЛЕЗА

Габдрахманова А.А., Мирзаянов Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Наряду с централизованным электроснабжением потребителей электроэнергии, перспективным является и децентрализованное, автономное электроснабжение. При автономном электроснабжении потребитель не зависит от линии электропередачи значительной протяженности, а следовательно, и от аварий, которые могут возникнуть на этой линии. Особый интерес представляет применение автономного электроснабжения в отдаленных малонаселенных районах, например в районах крайнего севера Российской Федерации, в связи с большой протяженностью кабельных линий, сложностью ландшафта и малым числом потребителей. Также автономное электроснабжение применяется в качестве резервного на различных объектах, согласно требований правил устройства электроустановок.

Основным в системе автономного электроснабжения (САЭ) является генератор. Для обеспечения экономической рентабельности применения САЭ ее генератор должен обладать максимальными энергетическими показателями, необходимой надежностью при эксплуатации в экстремальных условиях и простотой конструкции. Наиболее полно сегодня представленным требованиям отвечают высокочастотные бесконтактные магнитоэлектрические машины (БММ) [1].

Для достижения максимальных энергетических показателей и минимизации массогабаритных показателей БММ, приходится увеличивать частоту вращения их ротора, что в свою очередь приводит к повышению частоты вырабатываемого ими тока, а следовательно и к увеличению потерь в магнитопроводе, которые определяются в виде [2]:

$$P_{fe} = k_{m\Phi} P_{уд} B^2 m_{fe} \left( \frac{f}{f_{пр}} \right)^{1.3}, \quad (1)$$

где  $P_{уд}$  – удельные потери в железе статора;  $f$  – частота тока;  $B$  – индукция в железе статора;  $k_{m\Phi}$  – коэффициент использования магнитного потока;  $f_{пр}$  – частота перемещения.

Известно, что удельные потери в железе статора складываются из потерь на вихревые токи ( $P_{вх}$ ) и гистерезис, ( $P_{г}$ ):

$$P_{уд} = P_{вх} + P_{г} \quad (2)$$

Удельные потери на гистерезис могут быть определены в виде [3]:

$$P_{г} = \frac{2 S_f B^2}{\mu}, \quad \text{при } \xi \leq 1, \quad (3)$$

$$P_{г} = \frac{\sqrt{\pi} f^{1.5} (t) S_f B^2 a}{\sqrt{\mu\rho}}, \quad \text{при } \xi > 1, \quad (4)$$

где  $a$  – толщина листа стали;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление стали;  $\mu$  – магнитная проницаемость стали;  $S_f$  – коэффициент формы петли гистерезиса;

$\xi = a / \left( \frac{1}{k_r} \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \right)$  – параметр, характеризующий уменьшение потерь в железе статора;  $k_r$  – коэффициент уменьшения глубины проникновения магнитного потока.

Удельные потери на вихревые токи:

$$P_{\text{вх}} = \frac{\pi^2 f^2 a B^2}{6\rho}, \text{ при } \xi \leq 1, \quad (5)$$

$$P_{\text{г}} = \frac{\sqrt{\pi} f^{1,5} B^2 a}{2k_R \sqrt{\mu\rho}}, \text{ при } \xi > 1. \quad (6)$$

Одним из способов минимизации потерь в магнитопроводе статора является, как видно из представленных рассуждений, снижение удельных потерь материала, из которого он изготовлен. Одним из материалов, обладающих очень низкими удельными потерями на вихревые токи и гистерезис является аморфное железо (АЖ). АЖ– это вещество с характерным строением, которое близко к структуре расплавленного металла. При этом, АЖ обладает необходимыми магнитными свойствами, но плохо проводит электрический ток, что предотвращает возникновение вихревых токов, поглощающих энергию. Такие сплавы позволяют сократить потери в железе в несколько раз [4].

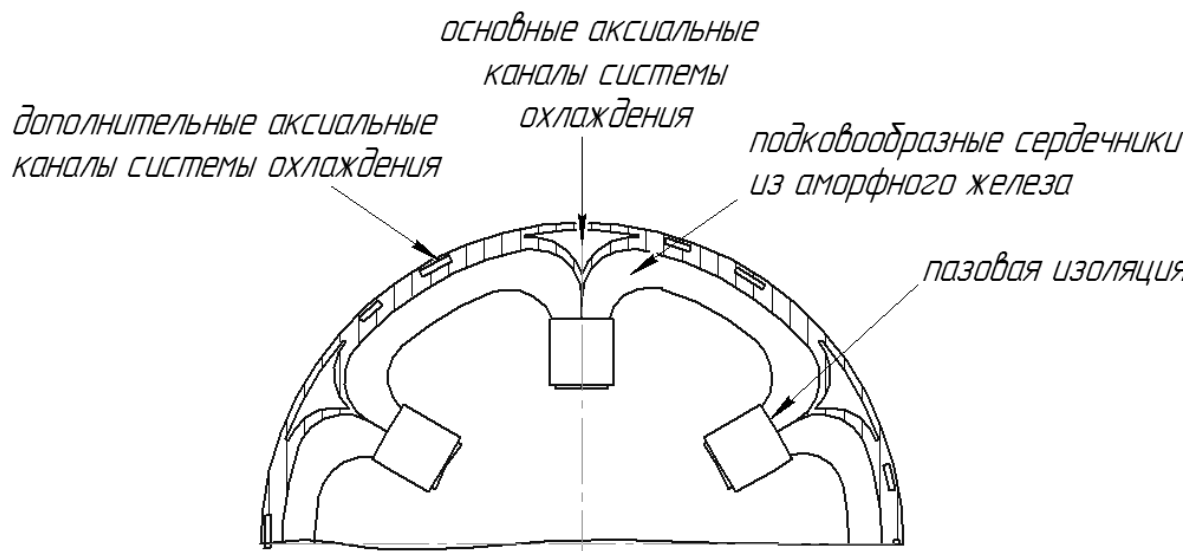
Плотность аморфного железа на 7–8% ниже плотности электротехнической стали. Однако, индукция насыщения аморфного железа, значительно ниже индукции насыщения электротехнической стали, но в тоже время, благодаря тому, что плотность аморфного железа меньше плотности электротехнической стали, появляется возможность создания магнитопровода из аморфного железа с теми же массовыми характеристиками, что и магнитопроводы из электротехнической стали или магнито–мягкого сплава, с незначительным увеличением габаритных размеров.

На кафедре электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета ведутся исследования по разработке магнитопроводов из аморфного железа, которое производится на Ашинском металлургическом заводе (г. Уфа), рисунок 1.



**Рис. 1.** Лента аморфного железа

В тоже время, ввиду того, что аморфное железо выпускается в виде ленты толщиной 25–30 мкм, его практическое использование требует разработки новых конструктивных схем магнитопровода статора. В качестве примера на рисунке 2 представлена конструктивная схема магнитопровода из аморфного железа.

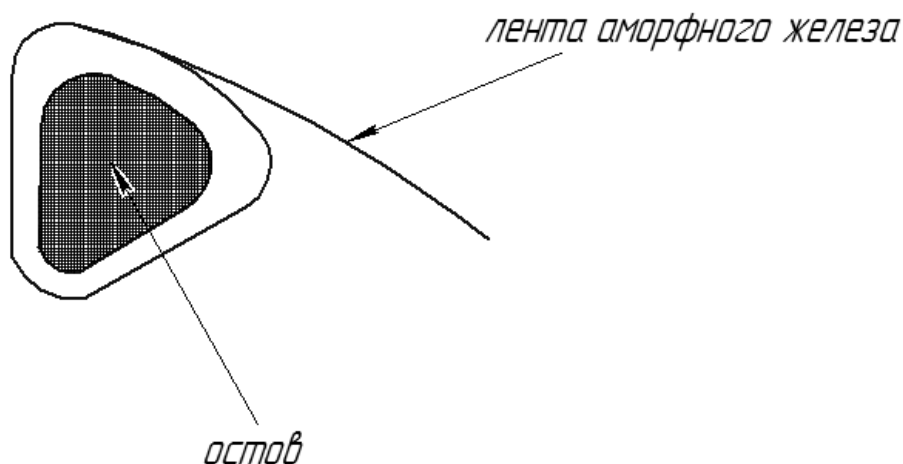


**Рис. 2.** Конструктивная схема магнитопровода статора из аморфного железа

Представленная на рисунке 2 конструктивная схема состоит из  $n$ -подковообразных сердечников набранных из ленты аморфного железа, установленных в диэлектрическом остове и образующих пазы и зубцы магнитопровода статора, обмотку, уложенную в пазах статора, при этом диэлектрический остов выполнен в виде рубашки охлаждения с аксиальными трубками, форма которых профилирует форму пространства между подковообразными сердечниками, а по периметру диэлектрического остова введены дополнительные каналы охлаждения, причем по всей осевой длине боковых поверхностей пазов установлена система из охлаждающих трубок, одна из поверхностей которой плотно прилегает к обмотке, а другая к зубцу, дно пазов с уложенной в них обмоткой и трубками охлаждения залиты неэлектропроводящим, немагнитным материалом с высокой теплопроводностью, а внутренняя поверхность пазов залита неэлектропроводящим, немагнитным материалом с низкой теплопроводностью, таким образом, что внутренняя поверхность статора гладкая.

К достоинствам представленной конструктивной схемы магнитопровода статора относится то, что система охлаждения располагается в каналах, образуемых при сборке магнитопровода из подковообразных сердечников аморфного железа, что позволит минимизировать диаметральные габаритные размеры, кроме того подобное изготовление магнитопровода статора позволяет минимизировать отходы при производстве, а следовательно повысить экономическую эффективность генератора.

При этом изготовление из  $n$ -подковообразных сердечников из аморфного железа может быть осуществлено намоткой тонкой ленты на специализированный остов, рисунок 3, с последующим открытием пазов.



**Рис. 3.** Изготовление магнитопровода с закрытыми пазами из аморфного железа

Использование магнитопроводов из аморфного железа позволит сократить потери в стали в несколько раз, а так же увеличить коэффициент полезного действия приблизительно на 2%, что является значимыми показателями, как в экономическом, так и в техническом плане.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании высокочастотных электромеханических преобразователей энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока.-М.: Высш. школа, 1982. 272 с.
2. Насыпная Е. П., Подход к расчету удельных потерь в электротехнических сталях // Труды Одесского политехнического университета. сер. Энергетика. Теплотехника. Электротехника. 2010. Т. 1(33). № 2(34). С. 116–123
3. Vavilov V., Gerasin A., Ismagilov F., Khayrullin I. An Algorithm for Controlling Hybrid Magnetic Bearings Using the Magnetic Field Pattern // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2013. Vol. 52. №. 5. pp. 794–799.
4. Аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы [<http://www.mstator.ru/products/amorf/>].

#### АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ПОВЫШЕННОЙ ЖИВУЧЕСТЬЮ

Иванов К.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Понятие живучести электропривода относится к разделу электромеханике, а именно к устройствам для регулирования числа оборотов электродвигателя и может быть использовано в широко регулируемых асинхронных электроприводах с повышенной живучестью при однократных или множественных отказах. Применяется в различных отраслях промышленности, таких как: военная техника, химическая промышленность металлургия, ядерная промышленность.

Задачей данной модели является обеспечение управления с повышенной живучестью  $n$ -секционного трехфазного асинхронного электропривода в случае

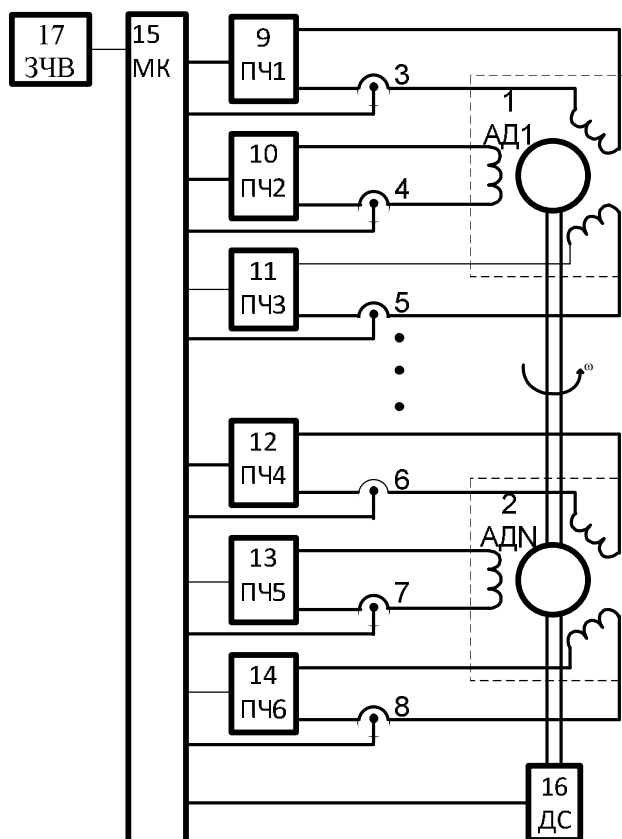


одиночных или множественных отказов. В предложенном асинхронном электроприводе с повышенной живучестью используется микроконтроллер, который позволяет выявить отказ в одном из  $n$ -преобразователей частоты, либо выявить отказ одного из фаз  $n$ -секционного двигателя. В результате по программе микроконтроллера происходит адаптация структуры электропривода из рабочего трехфазного в аварийный двухфазный режим работы. При этом вектор одного из токов в отказавшей секции смещается на угол  $\pi/3$  с сохранением одинаковой амплитуды токов в фазах и в результате обеспечивается сохранение кругового вращающегося поля в магнитном зазоре той секции электрического двигателя, где произошел отказ, при этом оставшиеся  $n-1$  секции электропривода продолжают работать в трехфазном режиме. При последующих отказах в этой же секции она выбывает из работы, и электропривод функционирует с пониженной активной мощностью, но с обеспечением свойства живучести. В процессе плавного истощения рабочего ресурса электропривода: – структурного (за счет формирования избыточности в виде  $n$ -секций вместо одной); – функционального (за счет обеспечения работоспособности каждой из  $n$ -секций двигателя на двух оставшихся фазах трехфазного двигателя в аварийном режиме) резервов в минимальном составе электропривода обеспечивается работа на двух оставшихся фазах одной работоспособной секции при отказавших  $n-1$  секциях включительно, что позволяет обеспечить работоспособность, как при одиночных, так и при множественных отказах электропривода с обеспечением свойства повышенной живучести.

На рисунке 1 представлена функциональная схема отказоустойчивого асинхронного электропривода выполненного на основе  $n$ - секционного трехфазного асинхронного двигателя. Отказоустойчивый асинхронный электропривод с повышенной живучестью содержит  $n$ -асинхронных двигателей 1 (АД 1), ..., 2(АД $n$ ), каждая фаза которых через соответствующие датчики тока 3 (ДТ1), 4(ДТ2), 5 (ДТ3), ..., 6 (ДТ4), 7 (ДТ5), 8 (ДТ6) подключена к соответствующему трехфазному преобразователю частоты 9 (ПЧ1), 10 (ПЧ2), 11 (ПЧ3), ..., 12 (ПЧ4), 13 (ПЧ5), 14 (ПЧ6). Все преобразователи частоты 9 (ПЧ1), 10 (ПЧ2), 11 (ПЧ3), ..., 12 (ПЧ4), 13 (ПЧ5), 14 (ПЧ6) и датчики тока 3 (ДТ1), 4 (ДТ2), 5 (ДТ3), ..., 6 (ДТ4), 7 (ДТ5), 8 (ДТ6) подключены к микроконтроллеру 15 (МК). На общем валу асинхронных двигателей 1 (АД1), ..., 2 (АД $n$ ) установлен датчик скорости 16 (ДС), выход которого подключен к микроконтроллеру 15 (МК). Задатчик частоты вращения вала двигателя 17 (ЗЧВ) подключен к микроконтроллеру 15 (МК).

В случае возникновения аварийной ситуации в одной из фаз асинхронного двигателя 1 (АД), или ..., или 2 (АД), или в преобразователях частоты 9 (ПЧ1), 10 (ПЧ2), 11 (ПЧ3), ..., 12 (ПЧ4), 13 (ПЧ5), 14 (ПЧ6) выявляется отказ на основе анализа сигнала текущей ошибки регуляторов тока в микроконтроллере 15(МК). В результате, происходит восстановление работоспособности за счет активизации алгоритма восстановления в микроконтроллере 15(МК) при переключении из рабочего трехфазного в аварийный двухфазный режим работы.

При этом один из двух оставшихся векторов тока смещается на угол  $\pi/3$  с сохранением одинаковой амплитуды тока в фазах и в результате, обеспечивается сохранение кругового вращающегося поля в магнитном зазоре асинхронных двигателей 1 (АД), ..., 2 (АД), где произошел отказ [2].



**Рис. 1.** Функциональная схема отказоустойчивого асинхронного ЭП

В качестве примера функционирования алгоритма восстановления, корректируют мгновенные значения фазных токов асинхронного двигателя 1(АД1),..., 2(АДN) для опережающей фазы вектора тока по выражениям:

$$I_A = I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot b);$$

$$I_B = I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot c + 2\pi/3);$$

$$I_C = I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot a + 4\pi/3);$$

а для отстающей фазы вектора тока:

$$I_A = I_\omega \cdot \bar{a} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot c) \sqrt{b^2 - 4ac};$$

$$I_B = I_\omega \cdot \bar{b} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot a + 2\pi/3);$$

$$I_C = I_\omega \cdot \bar{c} \cdot \sin((2^\sigma - 1 - \alpha) \cdot \bar{d} + \alpha \cdot d \pm \pi \cdot b + 4\pi/3),$$

где  $I_\omega$  – значение амплитуды формируемых фазных токов, А;  $\sigma$  – число двоичных разрядов выходного кода цифрового сигнала, полученного в результате интегрирования сигнала с датчика скорости 16 (ДС);  $d$  – значение бита, вычисляемого по логическому выражению:  $d = a \cup b \cup c$ ,  $\cup$  – логическая операция ИЛИ, если  $d = 1$  – есть отказ в одной из фаз;  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$  – инверсные значения битов  $a, b, c, d$ ;  $\alpha$  – значение текущего двоичного кода цифрового сигнала, полученного в результате интегрирования сигнала с датчика скорости 16 (ДС).

Таким образом, предложенное техническое решение позволяет обеспечить повышенную живучесть  $n$ - секционного трёхфазного асинхронного электропривода

при однократных или множественных отказах с сохранением кругового вращающегося поля в воздушном зазоре двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов Д.М. Моделирование многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах: автореферат Изд-во ТПУ, 2005. – 18 с.
2. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. –Высшая школа, 1988. – с. 479.

### ДИАГНОСТИКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДОБАВОЧНОМУ ТОКУ КОММУТАЦИИ

Кулибаба М.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Тяжелые условия эксплуатации локомотивов предъявляют высокие требования к техническому состоянию отдельных узлов и агрегатов. Особое место в них занимают тяговые электродвигатели (ТЭД), которые являются наиболее нагруженными и, одновременно, наиболее уязвимыми и неконтролируемыми узлами.

На долю ТЭД приходится свыше 50% возникающих неисправностей, из-за которых отрасль терпит убытки, связанные с внеплановыми ремонтами, простоями, исчисляемыми десятками часов, а также с аварийными ситуациями, нарушающими безопасность движения.

Одним из основных узлов тяговых электрических машин является коллекторно-щеточный узел (КЩУ). Большая часть неисправностей ТЭД связана с обмотками и проявляется в нарушении процесса коммутации. Увеличение искрения вызывается также многими причинами механического характера. Проявление нарушений коммутации в искрении коллекторно-щеточного узла давно рассматривается как показатель состояния машины постоянного тока и, в частности, ТЭД.

Под коммутацией тока понимают процесс изменения направления тока в секции обмотки якоря при переходе ее из одной параллельной ветви в другую.

Так как добавочный ток  $i_d$ , складываясь с током  $i_a$ , приводит к повышению плотности тока под сбегаящим краем щетки, то под щеткой появляется искрение. Этот ток обусловлен наличием нескомпенсированной ЭДС в короткозамкнутой секции и изменением площади скользящего контакта:

$$i_d = \frac{\Delta e_r}{R_{\text{щ}} + r_c},$$

где  $\Delta e_r$  - нескомпенсированная ЭДС в короткозамкнутой секции, В;

$R_{\text{щ}}$  – сопротивление контакта щетка – коллектор, Ом;

$r_c$  – активное сопротивление секции, Ом.

Самой лучшей коммутацией считается прямолинейная, при которой ток  $i_d$  равен нулю. Так как величина добавочного тока  $i_d$  зависит от величины ЭДС в коммутируемой секции и от сопротивления переходного контакта между щеткой и коллекторными пластинами то улучшать коммутацию можно, увеличивая сопротивление щеток или уменьшая ЭДС в коммутируемой секции до нуля. Увеличение сопротивления щеток для улучшения коммутации может быть применено только в машинах малой мощности, так как при больших значениях тока якоря

повышение сопротивления щеток приведет к перегреву щеток и коллектора и к увеличению потерь в машине.

Для улучшения коммутации стремятся уменьшить сумму ЭДС до нуля.

Если коммутирующая ЭДС  $e_k$  больше реактивной  $e_p$ , то коммутация ускоренная. В этом случае появление добавочного тока  $i_d$  вызывает искрение под набегающим краем щетки.

Чтобы добиться равенства  $e_p + e_k = 0$ , нужно в зоне коммутации создать магнитное поле, которое индуцировало бы в коммутируемой секции коммутирующую ЭДС  $e_k$ , равную по величине реактивной ЭДС  $e_p$  и противоположную ей по знаку. Это может быть достигнуто сдвигом щеток с физической нейтрали по направлению вращения якоря у генераторов и против направления вращения якоря у двигателей.

При вращении якоря генератора по часовой стрелке в проводах обмотки якоря, находящихся под северным полюсом, ЭДС и ток направлены от нас. В проводах коммутируемой секции, находящихся на физической нейтрали, коммутирующая ЭДС  $e_n$  равна нулю, а реактивная  $e_v$  имеет такой же знак, который имела коммутирующая ЭДС в проводах, находящихся под северным полюсом.

Целью моей магистерской работы является нахождение способа, который бы полностью ликвидировал или свел к минимуму возникновения добавочного тока коммутации.

Теперь о магнитной системе ТЭД. В неё входят: главные и добавочные полюсы (с полюсными катушками, фланцами, стальными и диамагнитными прокладками, наконечниками), компенсационные обмотки, межкатушечные соединения. Перечисленные узлы магнитных систем тяговых двигателей электровозов постоянного тока по конструктивному исполнению весьма схожи, что предопределяет общий технологический подход к их ремонту как в условиях депо, так и в условиях ремонтных заводов. Однако в методах и технологии ремонта учитываются те конструктивные и технологические особенности, которые характерны для исполнения магнитной системы тяговых двигателей соответствующих типов.

Магнитные системы тяговых двигателей электровозов постоянного тока условно можно разделить на три типа: четырехполюсного исполнения (тяговые двигатели ДПЭ-400, НБ-411, НБ-406Б), шестиполюсного исполнения с компенсационными обмотками (ТЛ-2К1, НБ-407Б) и шестиполюсного исполнения без компенсационных обмоток (тяговые двигатели пассажирских электровозов ЧС).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://deepbomb.ru/Sushnost-processa-kommutacii-3>
2. <http://scbist.com/studentu-lokomotivschiku/23321-remont-magnitnoi-sistemy-ostovatyagovogo-elektrodvigatelya-tl-2k-v-obeme-tr-3-a.html>

#### ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Михеев А.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Исследования систем технического обслуживания и ремонта трансформаторов актуально, изучения этой темы снижает уровень поломок и дефектов при эксплуатации трансформаторов.

Цель работы – исследование систем технического обслуживания и ремонта трансформаторов.

Надежность функционирования трансформаторного оборудования непосредственно связана с его сроком службы. От продолжительности эксплуатации трансформатора зависят допустимые значения воздействующих режимных факторов и их количество.

Наиболее часто в трансформаторах повреждаются обмотки высокого напряжения, реже низкого напряжения. Повреждения в основном происходят из-за снижения электрических свойств изоляции на каком-нибудь участке обмотки, в результате чего наступает электрический пробой изоляции между витками и их замыкание, приводящее к выходу трансформатора из строя.

Наиболее слабые и часто повреждаемые узлы независимо от источника этих повреждений, согласно статистическим данным приведены на диаграмме.



**Рис. 1.** Наиболее слабые и часто повреждаемые узлы

В целях своевременного обнаружения и устранения развивающихся дефектов и предупреждения аварийных отключений для трансформаторов периодически проводятся текущие и капитальные ремонты.

**Текущий ремонт** выполняется на месте установки трансформатора, без его вскрытия и демонтажа ошиновки, подсоединяющей его к внешней электросети, является чисто профилактическим ремонтом. Его выполняет ремонтный персонал службы эксплуатации электроустановки.

В объем текущего ремонта входят:

1. наружный осмотр;
2. выявление и устранение мелких дефектов в арматуре, системе охлаждения, навесных устройствах;
3. подтяжка креплений, устранение течей масла и доливка масла;
4. чистка изоляторов и бака;

5. спуск грязи из расширителя, доливка в случае необходимости масла, проверка маслоуказателя;
6. проверка опускного крана и уплотнений;
7. осмотр и чистка охлаждающих устройств;
8. проверка газовой защиты;
9. замена сорбента в термосифонном фильтре;
10. протирка наружных поверхностей от загрязнений;
11. измерение сопротивления изоляции обмоток и другие мелкие работы.

Продолжительность такого ремонта в зависимости от мощности трансформатора составляет от нескольких часов до 1-2 суток.

**Средний ремонт** кроме работ, входящих в текущий ремонт, включает вскрытие трансформатора с подъемом активной части (или съемной части бака, если бак имеет нижний разъем), мелкий ремонт или замену (при необходимости) вводов, отводов, переключающих устройств, охладителей, маслозапорной арматуры, масляных насосов, вентиляторов и т. д. Его выполняют с отключением и доставкой трансформатора на ремонтную площадку.

**Капитальный ремонт** кроме работ, выполняемых при среднем ремонте, включает ремонт активной части с ее разборкой и восстановлением или заменой обмоток и главной изоляции, иногда ремонт магнитной системы с переизолировкой пластин. Капитальные ремонты вызваны в отдельных случаях повреждением остова, обмоток и изоляции в результате аварий, износом изоляции. Вместе с тем в энергетическом хозяйстве имеется еще сравнительно много отечественных и зарубежных трансформаторов устаревших конструкций, которые подлежат капитальному ремонту и реконструкции для повышения их надежности и приведения параметров в соответствие с новыми стандартами.

Капитальный ремонт трансформатора производится в следующем объеме:

1. вскрытие трансформатора, подъем сердечника (или съемного бака) и осмотр его,
2. ремонт магнитопровода, обмоток (подпрессовка), переключателей и отводов,
3. ремонт крышки, расширителя, выхлопной трубы (проверка целостности мембраны), радиаторов, термосифонного фильтра, воздуха осушителя, кранов, изоляторов,
4. ремонт охлаждающих устройств,
5. чистка и окраска бака,
6. проверка контрольно-измерительных приборов, сигнальных и защитных устройств,
7. очистка или смена масла,
8. сушка активной части (в случае необходимости),
9. сборка трансформатора,
10. проведение измерений и испытаний.

В заключении можно сделать выводы, чем выше надежность функционирования трансформаторного оборудования тем больше оно прослужит. Периодически выполняя текущий и капитальный ремонты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин: учеб. Пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
2. Ящура А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006 – 504 с.

## **ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ ОБМОТОК ЧРП**

Солдатенко Е.Ю., Чарков Д.И.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Преимущества использования системы частотного управления сопряжены недостатком – отрицательным действием на электрическую изоляцию. Это приводит к резкому снижению срока службы обмоток, в первую очередь межвитковой изоляции – как самого слабого элемента обмотки. В этой связи остро ставится вопрос о способах и средствах испытаний изоляции эмалированных проводов, обеспечивающих достаточно достоверную оценку свойств, а также позволяющих судить о целесообразности применения того или иного провода в обмотках частотно-регулируемого привода (ЧРП).

Существующие ряд методов, нормированных различными ГОСТ, техническими условиями и пр., и позволяющих оценить уровень основных электрических и механических свойств эмалевой изоляции. В тоже время не учитываются особенности работы обмоток при частотном управлении. (повышенный уровень электрических нагрузок) .

Проведено определение электрических и механических свойств ряда широко применяющихся марок обмоточных проводов существующими стандартными методами. Механические свойства оценивались по испытаниям на истирание иглой, процарапыванием с постоянно увеличивающейся нагрузкой, а также путем определения дефектности изоляции провода в состоянии поставки и после навивания на металлический стержень. Помимо этого было определено пробивное напряжение эмалевой изоляции в состоянии поставки и после навивания на металлический стержень, равный двойному диаметру провода. Полученные результаты приведены в свидетельствуют о удовлетворительном качестве всех испытываемых образцов.

К сожалению, в настоящее время в отечественной практике недостаточно рекомендаций по определению стойкости эмалированных проводов к коронным разрядам. Это обстоятельство определило применение оригинальных методик для исследования данного вопроса. Основная идея при проведении испытаний - помещение образца в среду действия коронных (поверхностных) разрядов, образующихся под действием электрического поля высокой напряженности. Испытания проводились тремя способами: в системах электродов «провод-дробь» и «провод-пластина» (испытательное напряжение от 4 до 5 кВ промышленной частоты при комнатной температуре; воздействием высокочастотного модулированного сигнала при температуре класса нагревостойкости (подавалось напряжение переменного тока с амплитудой 1200 В, частота 400 Гц с частотой квантования напряжения 5 кГц с крутизной нарастания переднего фронта 4 мкс). В первом случае образцом служил одиночный отрезок провода, во втором – стандартная скрутка. Критерием короностойкости принято среднее время до пробоя партии образцов (не менее 10).

Обобщая полученные результаты можно сделать следующие выводы:

Эмалированные провода, предназначенные для использования в обмотках частотно-регулируемого привода необходимо испытывать на стойкость к действию коронных разрядов. Практически все рассмотренные в работе образцы прошли стандартные испытания, показав хороший уровень электрических и механических свойств. В то же время это не гарантирует необходимую стойкость эмалевой изоляции к ужесточенным электрическим нагрузкам, обусловленным особенностями действия ШИМ.

Обязательным условием обеспечения необходимого уровня надежности является использование короностойких обмоточных проводов (например провод ПЭТД2-К-180).

Определение способности эмали провода длительно эксплуатироваться в условиях частотного управления возможно после испытаний высокочастотными электрическими импульсами. В этом случае на образец воздействует комплекс нагрузок, соответствующий условиям эксплуатации: температура, электрические перенапряжения, коронные разряды. Испытания в системах «электродов провод-дробь», «провод-пластина», как более простые, позволяют сделать лишь предварительную оценку стойкости эмалевой изоляции к действию высокого напряжения.

Существует необходимость в разработке нормативной базы для определения короностойкости эмалированных обмоточных проводов.

## **УЛУЧШЕНИЕ ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ**

Романюк В. С., Шитик А. М.

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

Одним из наиболее распространенных регуляторов на практике является ПИД-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор). Его широко применение связана с универсальностью и большим количеством инструментов для анализа линейных систем. Но у алгоритма присутствуют и недостатки, в первую очередь, интегральное насыщение и регулирование объектов с существенным запаздыванием.

Интегральное насыщение – это наиболее типовое проявление режима ограничения управляющего воздействия, которое возникает в процессе выхода системы на режим в регуляторах с ненулевой постоянной интегрирования. Интегральное насыщение приводит к затягиванию переходного процесса. Аналогичный эффект возникает вследствие ограничения пропорционального и интегрального члена ПИД-регулятора. Однако часто под интегральным насыщением понимают совокупность эффектов, связанных с нелинейностью типа «ограничение». Эта нелинейность связана с естественными ограничениями на мощность, скорость, частоту вращения, угол поворота, площадь поперечного сечения клапана, динамический диапазон и т. п. Контур регулирования в системе, находящейся в насыщении (когда переменная достигла ограничения), оказывается разомкнутым, поскольку при изменении переменной на входе звена с ограничением его выходная переменная остается без изменений.

При большом запаздывании рекомендуется использовать упредитель Смита. Однако такое решение приемлемо только при постоянстве величины запаздывания. В случае его изменения контур регулирования становится неустойчивым.

Существуют различные пути повышения регуляторов и уменьшения интегрального насыщения. В частности в регуляторах очень часто используется функция отключения интегрирующей составляющей при большом значении величины рассогласования. Современные вычислительные возможности микропроцессорной техники позволяют реализовать различные алгоритмы, что позволяет не ограничивать себя при исследованиях.

Известны работы, которые позволяют исключить интегральное насыщение за счет нелинейных преобразований ошибки. Путем выдвижения одинаковых требований к качеству настройки, предлагается сравнить потенциальные возможности нескольких



нелинейных решений с учетом классической структуры ПИД-регулятора. Структурная схема управления, для которой проводились исследования, представлена на рис. 1.

В качестве нелинейной функции выбирались:

$$F(e) = \text{sign}(e) \ln(|e| + 1); \quad (1)$$

$$F(e) = \text{sign}(e) \sqrt{|e|}; \quad (2)$$

$$F(e) = \text{sign}(e) \cdot (\sqrt{|e| + 0,0025} - 0,05); \quad (3)$$

$$F(e) = e^3; \quad (4)$$

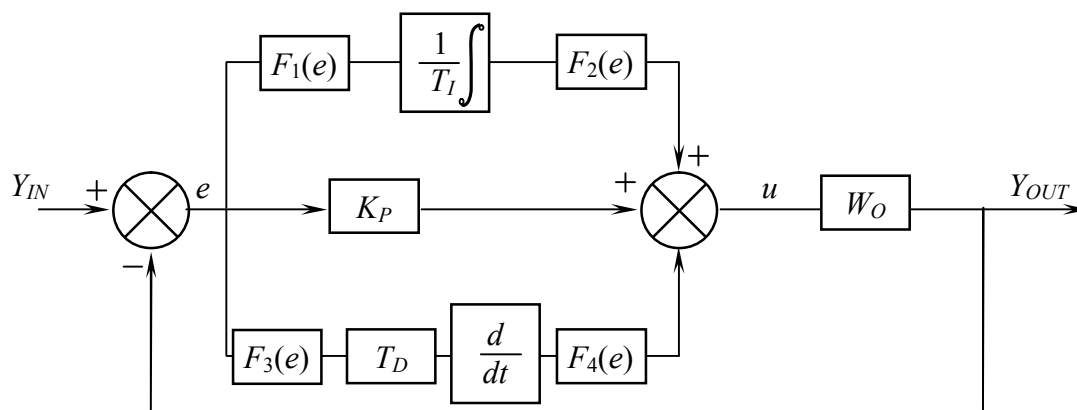
$$F(e) = e^7; \quad (5)$$

$$F(e) = \text{tg}(e); \quad (6)$$

$$F(e) = \text{arctg}(e); \quad (7)$$

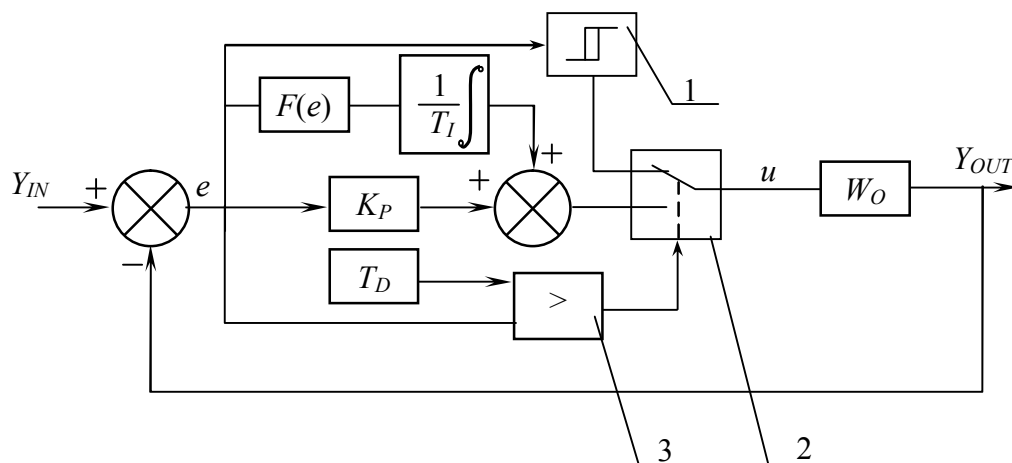
$$F(e) = \sinh(e); \quad (8)$$

$$F(e) = \text{tgh}(e); \quad (9)$$



**Рис. 1.** Структурная схема управления.  $Y_{IN}$  – управляющее воздействие,  $Y_{OUT}$  – выходной параметр,  $e$  – ошибка управления,  $u$  – управляющее воздействие,  $F(e)$  – нелинейная функция от ошибки,  $K_P$  – коэффициент усиления регулятора,  $T_I$  – время интегрирования ПИ-регулятора,  $p$  – оператор Лапласа,  $W_O$  – передаточная функция объекта,  $W_{BK}$  – передаточная обратной связи

Кроме, это исследовалась структура с переключением, смысл алгоритма работы которой – переход с аналогового на позиционный режимы в зависимости от уровня ошибки. При аналоговом режиме использовалась нелинейный ПИ-регулятор с использованием (1). Оптимизации подвергались значения настройки ПИ-регулятора и уровень переключения между режимами (рис. 2).



**Рис. 2.** Структурная схема управления с переключением.  $F(e)$  – нелинейная функция (1) от ошибки, 1 – позиционный регулятор (в случае положительной величины сигнал 0, при отрицательной сигнал 200% от стационарного значения  $u$ ); 2 – переключатель информационных потоков; 3 – компаратор

Для выше указанных нелинейностей, а также классического ПИД-регулятора, искались настройки исходя из минимизации следующего интегрального критерия

$$J = \int_0^{\infty} t^2 |e| dt \rightarrow \min \quad (10)$$

В качестве общего объекта была выбрана передаточная функция со следующими параметрами:

$$W_o = \frac{1}{900 p^2 + 60 zp + 1} \exp(-\tau p) \quad (11)$$

$z$  – коэффициент колебательности;  $\tau$  – время запаздывание.

Величина коэффициент колебательности и время запаздывание принимала фиксированные значения  $z = [0,5 \ 0,75 \ 1 \ 1,1 \ 1,2 \ 1,5 \ 2]$  и  $\tau = [0,5 \ 5 \ 10 \ 25 \ 40]$ .

Поиск настроек осуществлялся в программном пакете MatLAB путем численного моделирования, анализом переходного процесса на фиксированном диапазоне и с последующей корректировкой  $K_P$ ,  $T_I$  и  $T_D$ .

Поскольку одной из задач нелинейной структуры было борьба с интегральным насыщением, то после поиска для линейного объекта вводилось звено ограничения на управляющее воздействие и оптимизация проводилась повторно.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) линейный регулятор имеет преимущества по интегральному критерию только для объектов с малыми значениями  $z$  и величины запаздывания. Свои преимущества реализуются за счет большой величины коэффициента усиления. При этом время дифференцирования приобретало  $T_D$  значения превышающее время интегрирования  $T_I$ , что является недопустимым в условиях наличия шумов в измерительном тракте при регулировании технологических процессов. При введении ограничений на управляющее воздействие преимущества линейного регулятора исчезают. Лучшие результаты показывают алгоритмы с нелинейными преобразованиями, в частности с использованием функции логарифм, тангенс, гиперболических функций;

2) в случае, когда запаздывание сравнимо с постоянной времени или даже несколько больше нелинейные преобразования обеспечивают преимущества не только по

интегральному критерию, но другим качествам переходного процесса. И здесь снова преимущества за нелинейными функциями логарифм, тангенс, арктангенс.

3) алгоритм с переключением показал хорошие результаты практически при любых вариациях с запаздыванием и коэффициентом колебательности. Некоторые показатели качества переходного процесса у них были лучше чем у конкурентов. Практическое использование такого алгоритма затруднено наличием ограничений на скорость нарастания управляющего сигнала во многих технологических процессах.

4) использование функций с введением в степень и извлечением корня не продемонстрировали хороших результатов. Скорее всего это обусловлено нулевой величиной производной (или бесконечностью) при значении ошибки равной 0. Введение смещений функций усложнит процесс настройки при практическом использовании.

Окончательные выводы для прикладного использования можно будет сделать только при тестировании работы алгоритмов еще по каналу возмущения и работе при наличии помех.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ**

Хабилова И.Ф.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Тугоплавкие металлы — класс химических элементов (металлов), имеющих очень высокую температуру плавления и стойкость к изнашиванию. Основными представителями данного класса элементов являются элементы пятого периода — ниобий и молибден; шестого периода — тантал, вольфрам и рений. Все они имеют температуру плавления выше 2000 °С, химически относительно инертны и обладают повышенным показателем плотности. Благодаря порошковой металлургии из них можно получать детали для разных областей промышленности. Большинство определений термина тугоплавкие металлы определяют их как металлы имеющие высокие температуры плавления. По этому определению, необходимо, что бы металлы имели температуру плавления выше 4,000 F (2,20°C). Это необходимо для их определения как тугоплавких металлов[2]. Пять элементов — ниобий, молибден, тантал, вольфрам и рений входят в этот список как основные[3], в то время как более широкое определение этих металлов позволяет включить в этот список ещё и элементы имеющие температуру плавления 2123 K (1850°C) — титан, ванадий, хром, цирконий, гафний, рутений и осмий. Сопротивление к деформации ползучести (англ.) является определяющим свойством тугоплавких металлов. У обычных металлов деформация начинается с температуры плавления металла, а отсюда деформация ползучести в алюминиевых сплавах начинается от 200°C, в то время как у тугоплавких металлов она начинается от 1500°C. Это сопротивление к деформации и высокая температура плавления позволяет тугоплавким металлам быть использованными, например, в качестве деталей реактивных двигателей или при ковке различных материалов

Плазменное напыление — процесс нанесения покрытия на поверхность изделия с помощью плазменной струи.

Сущность плазменного напыления заключается в том, что в высокотемпературную плазменную струю подаётся распыляемый материал, который нагревается, плавится и в виде двухфазного потока направляется на подложку. При ударе и деформации происходит взаимодействие частиц с поверхностью основы или напыляемым материалом и формирование покрытия. Плазменное напыление является одним из вариантов газотермического напыления.

Плазменный процесс состоит из трех основных стадий:

- генерация плазменной струи;
- ввод распыляемого материала в плазменную струю, его нагрев и ускорение;
- взаимодействие плазменной струи и расплавленных частиц с основанием.

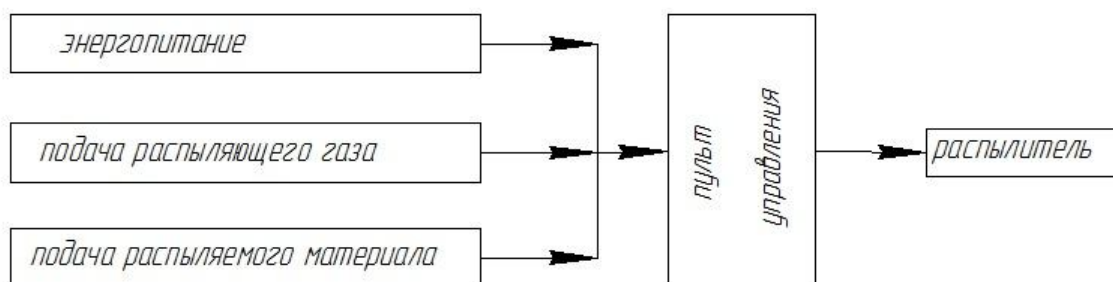
Для организации промышленных технологических плазменных процессов наиболее перспективными в настоящее время считаются электродуговые и высокочастотные электроприводы низкотемпературной плазмы.

С появлением нанотехнологий повысились требования к точности работе плазменных установок МАП 2,3, предназначенных для напыления нанослоев (10-50 нм) лития, хрома, никеля на лопатки авиационных двигателей с целью повышения жаропрочности, коррозионной стойкости и увеличения срока службы.

Высокотемпературные процессы предъявляют особые требования к конструкциям электроприводов:

- конструкция электроприводов в целом должна иметь высокую жесткость, хорошие виброгасящие элементы и демпфирующие характеристики. Особые требования предъявляются к конструкции направляющих, которые должны обеспечить плавное безлюфтовое движение перемещающихся частей электропривода.
- все конструктивные элементы электроприводов в процессе работы должны обеспечить термическую стабильность деталей при минимальных температурных деформациях, так как тепловое расширение частей напрямую влияет на качество обработки. Для уменьшения тепловых деформаций применяется специальная система охлаждения.

Структурное построение схем установок для газотермического напыления (рис.1) осуществляется по двум типам: полностью (или частично) интегрированные схемы или блочно-модульные схемы.

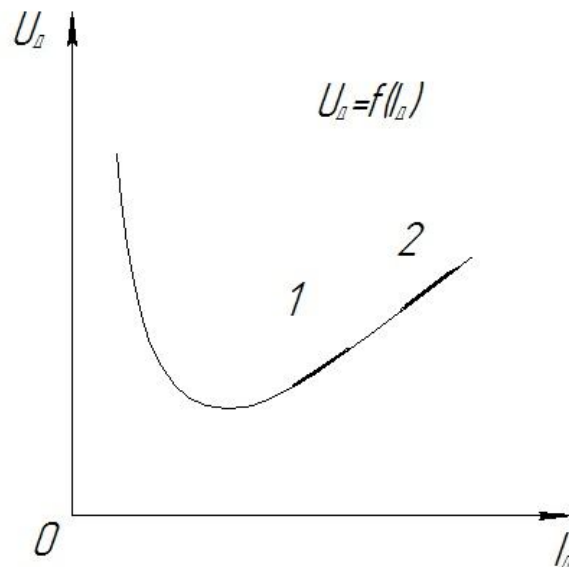


**Рис. 1.** Функциональная схема установки для газотермического напыления

Требования, предъявляемые к источникам энергопитания определяются особенностями горения дуги. При газотермическом напылении используют два вида сильноточных контрагированных дуг. В одном из них в дуговом разряде участвуют неплавящиеся электроды, в другом – плавящиеся.

Неплавящиеся электроды. Дуговой разряд возбуждается и горит в замкнутом объеме при интенсивном охлаждении столба потоком плазмообразующего газа. Создаются благоприятные условия для сжатия дуги. статическая вольтамперная характеристика

такой дуги, как правило, находится на возрастающей ветви зависимости  $U_d = f(I_d)$ , показанной на рисунке 2 (участок 1).



**Рис. 2.** Статическая вольтамперная характеристика дуги при различных плотностях тока: 1-участок, характерный для дуги, горящей в плазматроне; 2-участок, характерный для дуги при электродуговой металлзации

Напряжение, необходимое для зажигания дуги, высокое. Оно обусловлено значительной величиной расстояния между электродами (2-5 мм). Для возбуждения дуги в плазменных распылителях применяются облегчающие методы. В этом случае отпадает необходимость в использовании высоких напряжений холостого хода источника. Его выбирают несколько большим напряжения, необходимого для горения дуги ( $U_0 > U_d$ ). В зависимости от условий напыления напряжение холостого хода составляет 120-320 В. Невысокие значения  $U_0$  требуются при работе на аргоне ( $U_0 = 90-120$  В); значительно более высокие при использовании азота ( $U_0 = 160-180$  В) и высокие при горении дуги в газах, содержащих водород ( $U_0 = 180-320$  В).

Для реализации больших мощностей дуги, необходимых для плазмообразования, требуются высокие значения тока. Исходя из этого, источники для плазменного напыления должны быть высокоамперными с широким диапазоном планового регулирования тока в пределах 100-1000 А.

Условия горения дуги в плазматронах достаточно стабильны. Длина дуги и расход плазмообразующего газа изменяются незначительно. Благодаря этому отпадает необходимость в высоких динамических свойствах источника. Под динамическими свойствами следует понимать, в первую очередь, скорость изменения тока и напряжения при изменении длины дуги, состава и расхода плазмообразующих газов и др.

Для питания дуги в плазменных распылителях применяют источники постоянного тока.

Плавающие электроды. Горение дуги происходит в специфических условиях, характерных для электродуговой металлзации. На столб дуги непрерывно действует поток сжатого воздуха, определяющий цикличность ее горения. Статическая вольтамперная характеристика дуги располагается на возрастающей ветви зависимости  $U_d = f(I_d)$ , показанной на рисунке 2 (участок 2).

Для зажигания дуги требуется сравнительно невысокое напряжение, обусловленное началом процесса с короткого замыкания. Можно принять напряжение зажигания близким к напряжению горения дуги:  $U_3 \approx U_d$ .

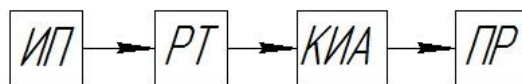
На практике горение дуги происходит при напряжении 20-40 В. Следовательно, для электродуговой металлизации требуются источники с невысоким напряжением холостого хода ( $U_d = 30-40$  В).

Производительность при напылении зависит, главным образом, от тока дуги. Поэтому необходимы высокоамперные источники с величиной тока 300-1000 А и плавным его регулированием в широком диапазоне.

Цикличность горения дуги требует источников питания с высокими динамическими свойствами. Например, скорость нарастания напряжения  $dU_d/dt$  в цикле должна быть максимальной. Скорость нарастания тока  $dI/dt$  должна быть высокой. Обычно она составляет 500-1200 кА/с.

Стабильность процесса при электродуговой металлизации определяется саморегулированием дуги. Принцип саморегулирования заключается в изменении скорости плавления электродов при изменении длины дуги. С изменением длины дуги связано изменение тока. Так, при увеличении длины дуги ток падает. При этом уменьшается скорость плавления проволоки. В случае постоянной скорости ее подачи, длина дуги самопроизвольно восстанавливается. Наоборот, уменьшение длины дуги приводит к возрастанию тока и скорости плавления. Соответственно увеличится и длина дуги.

Источники питания дуги в распылителях. В наиболее общем виде функциональная схема питания дуги в распылителе показана на рисунке 3. В качестве источника питания ИП могут быть использованы любые источники напряжения постоянного тока. Регулятор тока РТ предназначен для формирования ВАХ схемы питания и настройки ее на заданный режим по току. Контрольно-измерительная аппаратура (КИА) позволяет контролировать процесс горения дуги в распылителе ПР и отбирать сигнал для организации обратной связи. Обычно для этой цели используют датчик тока.



**Рис. 3.** Общая функциональная схема источника питания дуги в плазменном распылителе ПР

В настоящее время все большее применение в электроприводах для технологического оборудования электродугового плазменного напыления тугоплавких покрытий находят высокоточные быстродействующие электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением типа ПБВ и ДК.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 2012. – 432с.
2. Хасанов З.М., Гузаиров Р.М. К задаче синтеза систем электроприводов технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий// Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. - №1. – С. 146-149.

## ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМАХ НИЗКОВОЛЬТНОЙ МЕЖВИТКВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Рогожникова Ю.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В процессе изготовления и работы изоляция электрических машин подвергается механическим, температурным и химическим воздействиям, влиянию влаги, поверхностных загрязнений и электрического поля. Такая изоляция, выбираемая с учетом указанных воздействий, должна обеспечивать их бесперебойную работу в течение установленного срока службы.

Анализ отказа электрических машин в эксплуатации показал, что значительная часть их приходится на период приработки, в основном из-за скрытых дефектов в изоляции. Наибольший процент отказов машин в период приработки приходится на витковую изоляцию. [1] Необходимой надежности обмоток асинхронного двигателя можно достичь правильным выбором обмоточных проводов и пропиточных составов.

В настоящее время разработаны новые пропиточные составы и обмоточные провода, которые можно использовать в качестве межвитковой изоляции при изготовлении обмоток низковольтных двигателей.

В связи с тем, что основные свойства межвитковой изоляции формируются после пропитки, важно обеспечить качественную пропитку обмоток специальными лаками или компаундами.

При пропитке воздушные включения и пустоты в обмотках и изоляции заполняются пропитывающими составами, что делает изоляционную систему более монолитной и устойчивой к воздействию эксплуатационных нагрузок и окружающей среды.

Анализируя условия проникновения пропиточного состава в обмотку при ее пропитке, можно сделать вывод, что эти условия существенно зависят от таких физико-химических характеристик пропиточных составов, как: энергия смачивания пропиточными составами изоляции обмоточных проводов  $W_{\text{Э}}$ ; коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_{\text{ЖГ}}$  и краевого угла смачивания  $\cos\theta$ .

Для непосредственного измерения энергии смачивания пропиточными составами изоляции обмоточных проводов в ТПУ был разработан метод, основанный на измерении усилия втягивания образца обмоточного провода в пропиточный состав, что приводит к кажущемуся увеличению веса провода на величину  $\Delta m$ . При этом усилие втягивания образца в пропиточный состав будет пропорционально энергии смачивания. Выталкивающая сила будет противодействовать увеличению веса провода и для момента равновесия можно записать[3]:

$$W_{\text{Э}} = \sigma_{\text{ЖГ}} \cdot \cos\theta, \quad (1)$$

где  $W_{\text{Э}}$  – энергия смачивания ( $\text{кг}/\text{с}^2 = \text{Дж}/\text{м}^2$ );  $\sigma_{\text{ЖГ}}$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз: жидкость – газ ( $\text{кг}/\text{с}^2 = \text{Дж}/\text{м}^2$ );  $\cos\theta$  – краевой угол смачивания.

Обозначив увеличение веса провода в момент отрыва через  $\Delta m_1$ , получим:

$$\sigma_{\text{ЖГ}} = g \cdot \Delta m_1 / \Pi_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где  $\Pi_{\text{пр}}$  – периметр сечения провода;  $g$  – ускорение силы тяжести ( $\text{м}/\text{с}^2$ )

Затем рассчитываем величину угла смачивания[3]:

$$\cos\theta = \Delta m / \Delta m_1. \quad (3)$$

Определение времени и качества пропитки.

Для тех видов пропитки, когда пропиточный состав поступает в обмотку сверху, для определения времени пропитки используем выражение (4):

$$\tau = \frac{\nu l}{K g \sin \alpha} \left[ 1 + \frac{P_K}{\rho g l \sin \alpha} \ln \left| \frac{P_K}{P_K + \rho g l \sin \alpha} \right| \right], \quad (4)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость пропиточного состава [ $\text{м}^2/\text{с}$ ];

$l$  – длина полувитка обмоточной катушки [ $\text{м}$ ];

$K$  – коэффициент проницаемости обмотки [ $\text{м}^2$ ];

$g$  – ускорение силы тяжести [ $\text{м}/\text{с}^2$ ];

$\alpha$  – угол наклона поровых каналов к горизонту,  $\alpha=30^\circ\text{C}$ ;

$\rho$  – плотность пропиточного состава [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ];

$P_K$  – давление, обусловленное действием капиллярных сил [ $\text{Н}/\text{м}^2$ ];

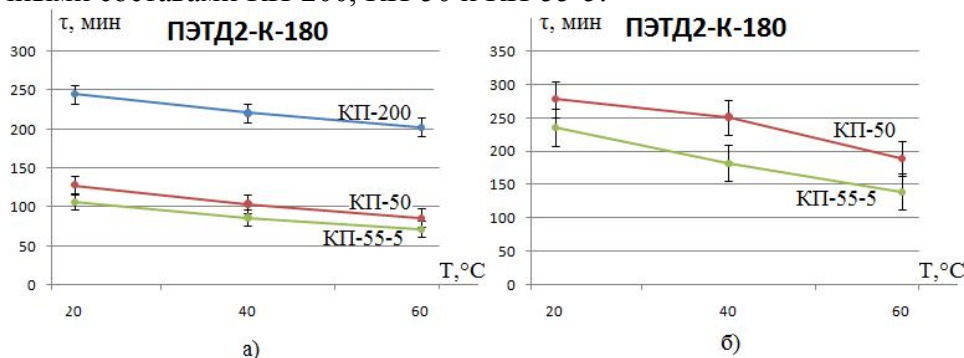
В случае, когда пропиточный состав поступает в обмотку снизу, применяем выражении (5):

$$\tau = \frac{l \sin \alpha}{\nu} = \frac{l \nu}{K g}, \quad (5)$$

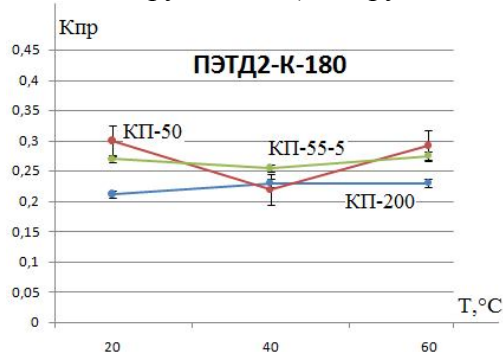
В связи с тем, что одним из основных назначений технологического процесса пропитки является заполнение свободного пространства между проводниками обмотки, поэтому для определения качества пропитки по выражениям [2]:

$$K_{np} = 1 - \left( 1 - \frac{P_K}{\rho g l_{об.м} \sin \alpha} \right) \cdot \left[ 1 - \frac{8,288 \cdot K_3 \cdot A(1 + 0,66A)}{(4 - \pi K_3)} \right], \quad (6)$$

В качестве результатов представим зависимости времени и качества пропитки от температуры для короностойкого обмоточного провода ПЭТД2-К-180 в сочетании с пропиточными составами КП-200, КП-50 и КП-55-5.



**Рис. 1.** Зависимости времени пропитки от температуры для провода ПЭТД2-К-180 ( а) – метод погружения, б) – струйный метод)



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента качества пропитки от температуры для провода ПЭТД2-К-180



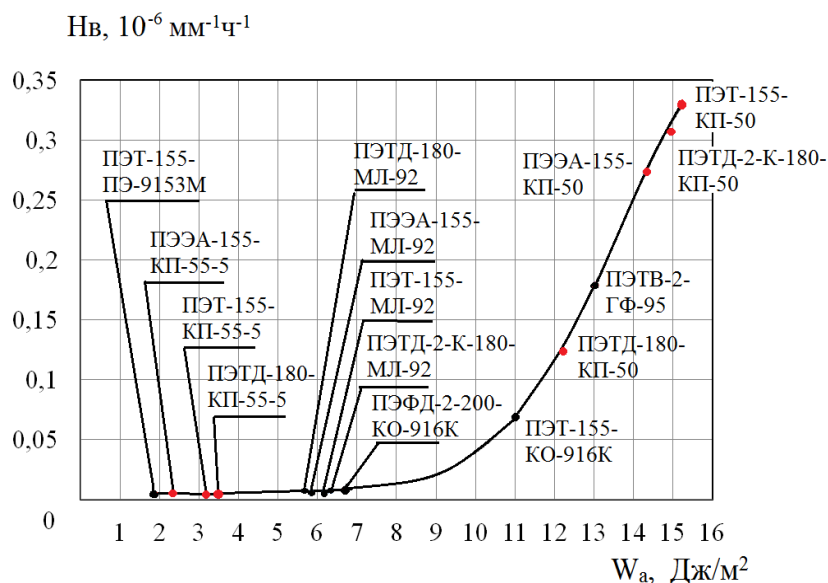
Таким образом, для оптимизации технических процессов можно порекомендовать при применении композиций ПЭТД2-К-180 – КП-200, КП-50 и КП-55-5 производить пропитку методом погружения.

Известно [4], что процесс разрушения межвитковой изоляции во многом определяется величиной адгезии между ее компонентами. В случае высокой адгезии процессы разрушения изоляции и образование сквозных дефектов значительно ускоряются в связи с повышением вероятности развития трещин из пропиточного состава в эмалевую изоляцию [5]. Пользуясь методикой определения работы адгезии, предложенной в [4], была подсчитана работа адгезии для новых пропиточных составов, исследуемых в работе, результаты представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Значение работы адгезии для исследуемых систем изоляции

Марка провода	Работа адгезии $W_a$ , Дж/м <sup>2</sup> / пропиточный состав.	
	КП – 50	КП – 55 – 5
ПЭТД – 180	12,197	3,178
ПЭТ – 155	15,212	3,154
ПЭТД 2 – К – 180	14,946	0,718
ПЭЭА – 155	14,330	2,323

Имея вновь рассчитанные данные, дополняем ранее полученную зависимость скорости дефектообразования от работы адгезии [4], рисунок 3.



**Рис. 3.** Зависимость вероятности безотказной работы от величины работы адгезии в исследуемых системах межвитковой изоляции

Данный результат наглядно показывает взаимосвязь  $W_a$  и процессов дефектообразования в изученных системах. Это связано с повышением вероятности развития сквозного дефекта в системе «пропиточный состав - эмалированный провод» что приводит к снижению надежности полученной композиции. Следовательно, рекомендуем использовать композиции имеющихся марок обмоточных проводов с пропиточным составом КП-55-5.

Предварительный отбор компонентов межвитковой изоляции позволит прогнозировать интенсивность процессов разрушения изоляции низковольтных обмоток при эксплуатации и оптимизировать выбор её компонентов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
2. Похолков Ю.П., Дудкин А.Н., Петров А.В. Моделирование технологического процесса пропитки и термообработки обмоток.//Электротехника, 1996, стр.45-49.
3. Дудкин А.Н. Электротехническое материаловедение: учебное пособие/ А.Н. Дудкин, В.С. Ким; Томский политехнический университет. – 2-е изд.- Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 199 с.
4. Леонов А.П, Супуева А.С. Определение работы адгезии в системе межвитковой изоляции. Интернет-журнал «Науковедение» №3 2013
5. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г., Хазановский П.М. Надежность изоляции электрических машин. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.

#### ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

Латыпов А.Р., Исмагилов Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

В настоящее время для получения сплавов, металлов и конструкционных материалов высокого качества, а также для изготовления, обработки деталей и изделий в авиационной, электронной и химической промышленности широко используются современные электротехнологические установки. С помощью таких установок реализуются процессы обработки металлов под штамповку, выращивания монокристаллов, спекания порошковых материалов. В большинстве случаев электропитание установок осуществляется от источников повышенной или высокой частоты. В качестве источников питания используются полупроводниковые преобразователи частоты, главным преимуществом которых является:

1. малый расход электроэнергии за счет повышенного КПД;
2. высокие регулировочные свойства (глубина регулирования 1:20);
3. плавное регулирование мощности в ходе технологического процесса.

В полупроводниковых преобразователях частоты используются инверторы. Существует большое количество вариантов схемных решений с использованием инверторов. Например, схема резонансного инвертора с удвоением частоты с отсекающим диодом, двухчейкового резонансного инвертора, мостовой последовательный инвертор со встречно-параллельными диодами и удвоением частоты[1].

Однако расширение частотного диапазона в случае применения полупроводниковых преобразователей довольно сложно. Это связано повышенным нагревом полупроводниковых ключей при увеличении частоты переключений. Одним из способов расширения частотного диапазона является каскадное включение тиристорного преобразователя и ферромагнитного учетверителя частоты. Принцип действия ферромагнитных умножителей частоты основан на нелинейных свойствах их насыщенных магнитопроводов.

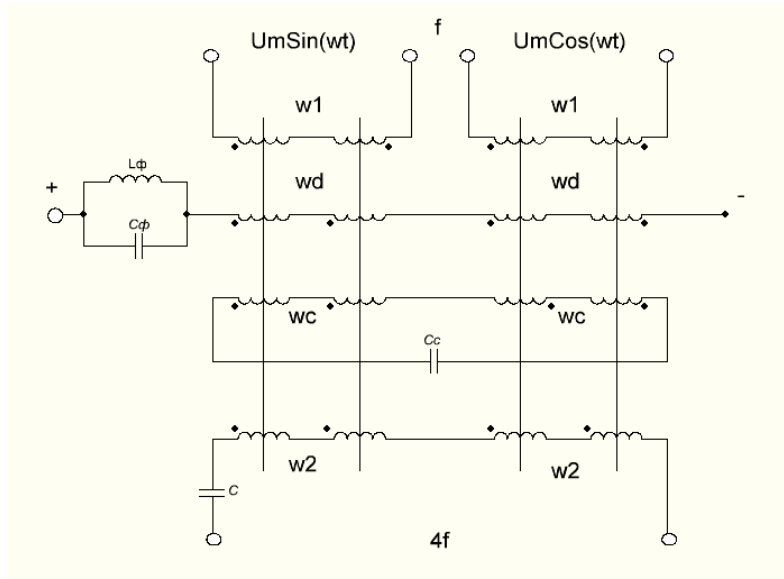


Рис. 1. Принципиальная схема ферромагнитного учетверителя частоты

Ферромагнитный учетверитель частоты содержит четыре многообмоточных насыщенных сердечника. Каждый сердечник содержит первичную и вторичную обмотки, обмотки подмагничивания постоянным током, самоподмагничивания током второй гармоники. Первичные обмотки соединяются встречно. Пары первичных обмоток питаются напряжением со сдвигом  $90^\circ$  от источника питания. Вторичные обмотки соединены последовательно-согласно с конденсатором продольной емкости и с выходными зажимами. Пары обмоток самоподмагничивания током второй гармоники соединены последовательно – встречно с конденсатором. Обмотки подмагничивания соединены последовательно-согласно с фильтром и подключены к источнику постоянного тока [2].

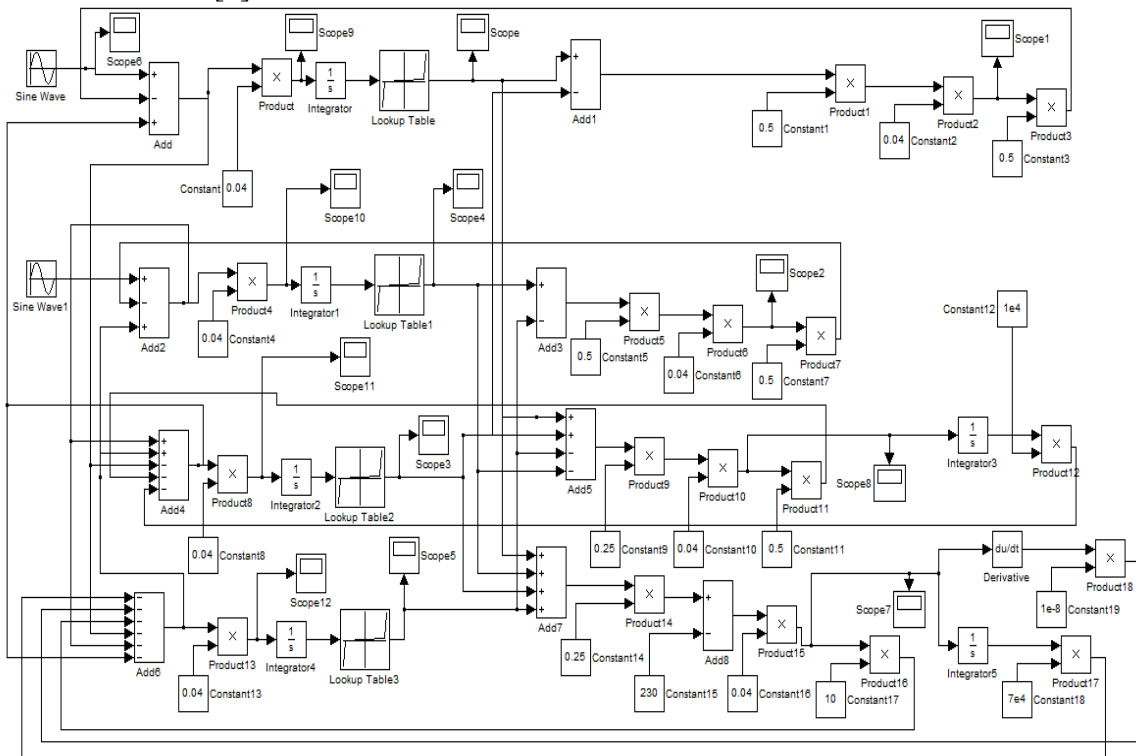
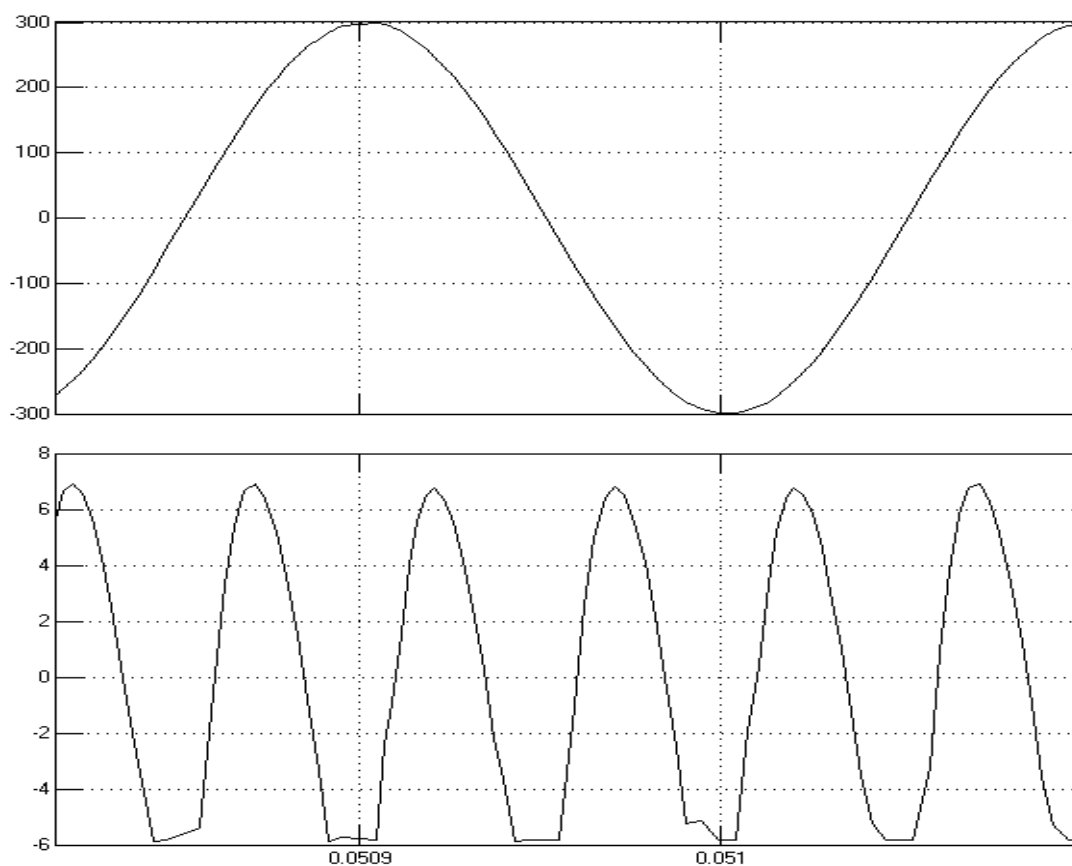


Рис. 2. Имитационная модель ферромагнитного учетверителя частоты

Так как ферромагнитный учетверитель имеет несколько магнитно связанных контуров, то легче всего рассматривать их имитационные модели в математическом пакете *Matlab*. В нашем случае модель учетверителя приспособлена для питания от тиристорных преобразователей частоты (рис.2).

Данная модель позволяет провести исследование переходных процессов при преобразовании частоты и получить наиболее подходящие значения параметров схемы. В дальнейшем планируется создание имитационной модели высокочастотного многофункционального ферромагнитного полупроводникового источника питания путем совмещения моделей учетверителя частоты и тиристорного преобразователя частоты.



**Рис. 3.** Формы кривой входного и выходного напряжения

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тиристорные преобразователи частоты / А.К.Белкин, Т.П. Костюкова, Л.Э.Рогинская, А.А.Шуляк. – М.: Энергоатомиздат, 2000.- 263 с.:ил.
2. Ферромагнитные умножители частоты/ А.М.Бамдас, И.В.Блинов, Н.В.Захаров, С.В.Шапиро – М., «Энергия», 1968. 176с, с илл. (Серия «Трансформаторы», вып.18).

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цой А.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

С 1995 г. в ИСЭ СО РАН разрабатывается новая технология построения импульсных генераторов на основе быстрых ступеней линейных импульсных трансформаторов LTD (от Linear Transformer Driver), позволяющая отказаться от традиционного подхода с использованием водяных линий при формировании мощных импульсов с длительностью  $\sim 100$  нс. В ступени LTD конструктивно объединены емкостной накопитель и первичный виток линейного трансформатора, что позволяет снизить эквивалентную индуктивность генератора и получить на нагрузке мощный короткий импульс без промежуточных обострителей.

Упрощенная схема ступени LTD показана на рисунке 1.

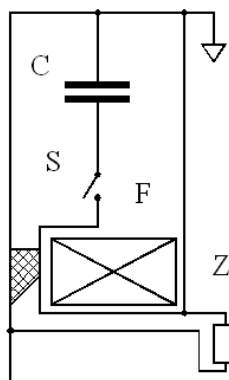


Рис. 1.

Накопительный конденсатор  $C$ , разрядник  $S$  и ферромагнитный сердечник  $F$  встроены в корпус ступени без использования кабелей в первичном витке, высоковольтный вывод ступени расположен на ее оси, нагрузка  $Z$  включена в разрыв вторичного витка. Такая конструкция полностью изолирует первичный виток от вторичного витка и обеспечивает минимальную индуктивность подводов к вторичному витку.

Емкостной накопитель быстрых ступеней LTD представляет собой батарею включенных параллельно идентичных RLC-контуров, включающих в себя емкость двух последовательно соединенных конденсаторов, индуктивность конденсаторов, разрядника и сопротивление разрядника, проводов и конденсаторов.

Каждый RLC-контур коммутируется на первичный виток трансформатора собственным газовым разрядником, и поэтому при одновременном срабатывании всех разрядников ступени временные параметры импульса на нагрузке определяются временной постоянной  $\tau = (LC)^{1/2}$  единичного.

Уменьшать длительность импульса можно уменьшая индуктивность или емкость контура. Индуктивность уменьшить трудно, поскольку она обусловлена конструкцией разрядника, конденсатора или ступени. А емкость можно просто уменьшить, поменяв конденсаторы. Но тогда возникает проблема, что с уменьшением емкости уменьшается ток через разрядник, и соответственно возрастает величина его индуктивности. И тогда уменьшение длительности выходного импульса будет происходить, только если увеличение величины индуктивности разрядника будет происходить в меньшей степени, чем уменьшение емкости конденсаторов.

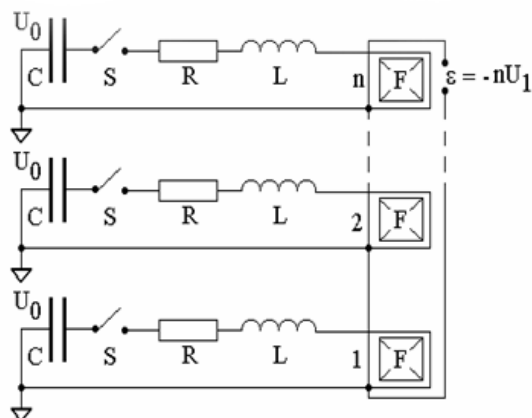


Рис. 2.

Так же требуется, чтобы система, состоящая из такого множества элементов, являлась надежной системой. А это возможно только в том случае если надежен каждый элемент в отдельности.

Стенд для испытания отдельного RLC-контура.

Для испытания отдельного RLC-контура была взята готовая кювета размером 63x83x18 см. В ней уже были готовы отверстия для подключения к маслянной, газовой и электрической системе. Так же был готов резистивный делитель для снятия кривой напряжения на нагрузке. Были измерены сопротивления делителя и вычислен коэффициент деления, величина которого составила 232 единицы. Были заменены газовые трубки, идущие от тройника к разряднику. Так же были заменены зарядные и пусковые резисторы, подсоединяемые к соответствующим разъемам. Сама кювета и вкладываемый в неё изолятор из полиэтилена были протерты с применением бензина. Затем в кювету установили отдельный RLC-контур, состоящий из собранных вместе разрядника, двух конденсаторов номинальной емкостью  $8\text{нФ}$  и нагрузки. Затем к разряднику подсоединялись зарядные и пусковые резисторы, трубки газораспределения. Так же подключили к кювете кабели зарядки, пусковой и газораспределение. Не закрывая кювету крышкой, заполняли её на две трети маслом для проверки на герметичность газовой разводки разрядника. При положительном результате масло сливали, закрывали кювету крышкой и заполняли маслом при вакууме порядка 0,5 атм.

Выводы:

При длительной работе синхронного генератора возникает такое явление, как витковое замыкание, обусловленное рядом причин, таких как постоянные температурные изменения, загрязнение обмотки, появление влаги.

Вследствие потенциальной опасности возникновения виткового замыкания, как для самой электрической машины, так и для обслуживающего персонала, разработка системы диагностики для такого рода повреждения крайне необходима.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким А.А. «Мощные первичные накопители с временем вывода энергии менее 1 мкс», диссерт. д-ра физ.-мат. Наук, 2001, Томск
2. Синебрюхов В.А диссертация «Быстрые ступени линейного трансформатора (LTD) с масляной изоляцией», диссерт. канд. техн. наук, 2009, Томск.

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ШАХТНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Кашеутов Д.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Для привода высокоэффективных, конкурентоспособных на внутреннем и внешнем рынке вентиляторов высокой производительности, требуются высоковольтные взрывозащищённые четырёхполюсные асинхронные двигатели с номинальным напряжением 6 кВ, мощностью 200 кВт и выше. Эти двигатели должны:

1. Обладать максимальной надёжностью в условиях аварийной работы;
2. Иметь простоту конструкции, простоту обслуживания, ремонтоспособность;
3. Обладать достаточной компактностью, хорошо встраиваться в вентиляционную установку;
4. При минимальной массе и габаритных размерах иметь КПД не ниже двигателей аналогов;
5. Иметь улучшенные пусковые свойства;
6. Удовлетворять эксплуатационно-техническим требованиям, предъявляемым к асинхронным двигателям для привода вентиляторов и при минимальных габаритных размерах обеспечивать КПД не ниже двигателей аналогов – ВАО или 1ВАО.

Однако, использование для привода вентиляторов серийных высоковольтных взрывозащищённых двигателей предложенных типов не оправдано из-за их пусковых свойств, конструктивных особенностей и массогабаритных показателей. Поэтому проектирование и создание высоковольтных асинхронных двигателей, предназначенных для привода вентиляторов высокой производительности, является актуальной задачей. Станина проектируемого двигателя выполнена из стального цилиндра с приваренными фланцами, лапами, проушинами, выводным патрубком, ребрами и трубами охлаждения. Конструкция такой станины значительно облегчает вес двигателя, а так же дает возможность ремонта станины, при механических повреждениях, либо отколе одной или нескольких её частей. В вентиляторах интенсивный наружный обдув двигателя осуществляется главным вентилятором, поэтому в проектируемом двигателе имеется возможность исключить радиальные вентиляционные каналы, что существенно упрощает конструкцию сердечника статора. Система вентиляции – аксиальная, с продуваемым ротором, в котором предусмотрены аксиальные каналы. По способу охлаждения аналогичен ИСО151 – закрытая машина, имеющая корпус с трубами для прохода воздуха, с внутренним вентилятором.

Требование компактности, предъявляемое к проектируемому двигателю, ограничивает наружный диаметр  $D_n = 0,66$  м и активную длину сердечника статора  $l_1 = 0,31$  м. Магнитопровод набран из штампованных листов электротехнической стали, марки 2412. Обмотка статора двухслойная, с укороченным шагом, выполненная из жёстких катушек изолированного провода прямоугольного сечения. Такая конструкция обеспечивает достаточную механическую прочность обмотки, повышает её долговечность и надёжность, а, следовательно, увеличивает ресурс двигателя. Двухслойная обмотка из жестких катушек укладывается в открытые прямоугольные пазы статора, рис.б.

С целью снижения добавочных потерь, что свойственно асинхронным двигателям с открытыми прямоугольными пазами статора, ширина паза статора должна быть минимальной или для крепления обмотки статора должны быть предусмотрены магнитные клинья.

Обмотка ротора выполнена из меди с припаянными короткозамкнутыми кольцами. Такая конструкция обмотки позволяет уменьшить номинальное скольжение двигателя, тем самым улучшив его энергетические показатели. Также это улучшит надежность ротора. Пазы ротора прямоугольные, закрытые

В оптимизационных расчётах постоянные данные; лимитирующие показатели представлены в [1]. При заданных значениях наружного диаметра и активной длины сердечника статора задачей оптимизационных расчётов является определение диаметра расточки статора  $D_1$ , обмоточных данных статора, размеров пазов статора и ротора, что и предопределяет выбор варьируемых переменных.

За варьируемые переменные приняты диаметр расточки статора  $D_1$ , число эффективных проводников в пазу статора  $U_{\text{п1}}$ , ширина прямоугольного провода  $b_{\text{м1}}$  обмотки статора, ширина медного стержня в пазу ротора  $b_{\text{с2}}$ .

Существуют рекомендации [3] к выбору диаметра расточки статора как  $D_1 = k_D \cdot D_{\text{н}}$ . При номинальном напряжении 6 кВ,  $2p=4$  коэффициент  $k_D = 0,61 \dots 0,66$ . Пределы варьирования диаметра расточки статора  $D_1 = 0,4 \dots 0,435$  м. Такие пределы варьирования диаметра расточки статора свойственны серийным асинхронным двигателям с кратностью пускового момента  $M_{\text{п}} \geq 1$  о. е.

Кратность пускового момента асинхронного двигателя для привода вентилятора обычно не оговаривается и может быть меньше единицы. По рекомендациям МЭК в асинхронных двигателях перспективных разработок кратность пускового момента может быть снижена до 0,65 о. е. Снижение кратности пускового момента в асинхронном двигателе для привода вентилятора до 0,65 о. е. позволит также снизить кратность пускового тока, что актуально для прямого пуска асинхронного двигателя.

С целью снижения кратности пускового тока целесообразно рассмотреть возможность проектирования асинхронного двигателя для привода вентилятора при диаметрах расточки статора  $D_1 \leq 0,4$  м.

При выбранных значениях диаметра расточки статора и постоянных исходных данных минимальное число активных проводников обмотки в пазу статора  $U_{\text{пmin}}$  определяется допустимой индукцией в воздушном зазоре  $B_{\text{оmax}}$ , а максимальное  $U_{\text{пmax}}$  – допустимой линейной нагрузкой  $A_{\text{1max}}$ .

В асинхронных двигателях с открытыми пазами статора значительную часть потерь составляют добавочные потери – пульсационные и поверхностные. Уменьшение добавочных потерь возможно за счёт применения магнитных клиньев или уменьшения ширины паза статора. В данной работе рассматривается возможность снижения добавочных потерь за счёт уменьшения ширины открытого паза статора.

С использованием метода [2,3], составлена MathCAD-программа оптимизационных расчётов с использованием метода полного перебора варьируемых переменных. При заданных постоянных исходных данных, ограничениях и варьируемых переменных диаметра расточки статора  $D_1 = 0,37 \dots 0,4$  м, числа активных проводников в пазу статора  $U_{\text{п1}} = 32, 34, 36$ , ширины проводника обмотки статора  $b_{\text{м1}} = 3,55, 4,5$  и  $4,75$  мм, ширины стержня короткозамкнутой обмотки ротора  $b_{\text{с2}} = 5; 5,5; 6$  и  $6,5$  мм получены следующие пределы изменения величин: КПД  $\eta = 0,94 \dots 0,942$ , коэффициента мощности  $\cos \phi = 0,86 \dots 0,88$ , кратности пускового тока  $I_{\text{п*}} = 5,4 \dots 7$ , кратности пускового момента  $M_{\text{п*}} = 0,75 \dots 1$ , масса меди обмотки статора  $G_{\text{м1}} = 73 \dots 85$  кг.



Следует отметить следующие закономерности результатов расчёта. Увеличение числа проводников  $U_{\text{пн}}$  в пазу статора с 32 до 36 приводит к снижению кратности пускового тока  $I_{\text{пн}}$  с 7 до 5,4 о.е., пускового момента  $M_{\text{пн}}$  с 1 до 0,75 о.е. и коэффициента полезного действия  $\eta$  с 0,942 до 0,94 о.е.. При этих же условиях увеличивается масса меди обмотки статора  $G_{\text{м1}}$  с 73 до 85 кг, незначительно возрастает коэффициент мощности  $\cos\phi$  с 0,86 до 0,88 причём, чем больше диаметр расточки статора  $D_1$ , тем больше коэффициент мощности. В большей степени при принятых ограничениях, функции цели удовлетворяет вариант расчёта при варьируемых переменных:  $D_1 = 0,38$  м,  $U_{\text{пн}} = 32$  проводника, размеры прямоугольного провода  $b_{\text{м1}} = 3,55$  мм и  $a_{\text{м1}} = 1,5$  мм, ширина стержня короткозамкнутой обмотки ротора  $b_{\text{с2}} = 6,5$  мм. Оптимально спроектированный двигатель обладает следующими характеристиками: КПД  $\eta = 0,942$ , коэффициент мощности  $\cos\phi = 0,867$ , кратность пускового момента  $M_{\text{пн}} = 0,83$ , кратность пускового тока  $I_{\text{пн}} = 6,5$ .

**Заключение.** Для проектируемого высоковольтного взрывозащищённого асинхронного двигателя разработан алгоритм и программа оптимизационных расчётов. При заданных ограничениях спроектирован высоковольтный асинхронный двигатель, удовлетворяющий функции цели – максимуму КПД (0,942 о.е.) и минимуму массы меди обмотки статора ( $G_{\text{м1}} = 73,6$  кг).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баклин В.С., Пушкарёв И.И. Алгоритм оптимизационных расчётов высоковольтных асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 132–136.
2. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П. и др. Проектирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
3. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

#### ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ МОНТАЖНОГО ПРОВОДА

Болгова В.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Надежность и работоспособность электрооборудования и систем энергообеспечения во многом определяется надежностью электрической изоляции. Например, проблемы с изоляцией обмоток статоров высоковольтных электрических машин, наряду с механическими проблемами опорных подшипников и дефектами монтажа, во многом определяют надежность и безаварийность работы крупных генераторов и электродвигателей. Значительное количество отказов электрооборудования происходит из-за скрытых дефектов и ослаблений изоляции. Это возникает, в большинстве случаев, вследствие критического превышения температуры. Появление перегревов носит случайный характер, их причинами могут быть электрические нагрузки, открытые источники тепла или огня. Опасность перегревов для изоляции заключается в необратимом тепловом старении, ускоряющем процессы деструкции структуры полимерной изоляции, что в свою очередь приводит к ухудшению электрических и механических свойств, снижению срока службы.

В связи с этим разработка нового технического решения обеспечивающего простой и наглядный метод контроля критического превышения температуры электрической изоляции является особенно актуальной, соответствует целевым государственным программам в области обеспечения безопасности и повышения энергоэффективности. Цветовые термоиндикаторы являются одним из перспективных средств не только регистрации, но и измерения температуры. К ним относятся вещества, обладающие способностью резко изменять свой цвет при определенной температуре, называемой критической или температурой перехода. Термоиндикаторы нашли широкое применение для исследования температурных режимов электро-, радио- и электронного оборудования, индикации нагрева режущего инструмента, исследования поверхностных температурных полей летательных аппаратов, вследствие простоты, рентабельности и широты возможностей при измерении температуры. Используя этот метод для контроля состояния изоляции можно визуально контролировать наличие критического нагрева. Это позволит своевременно выявить и заменить кабель, провод или любой элемент с ослабленной изоляцией. Как следствие, предотвращается аварийная ситуация и отказ всего оборудования.

Температурный диапазон и разнообразие современных термоиндикаторов делает их перспективными для осуществления контроля предаварийного состояния электрической изоляции. Наиболее важно обеспечить указанные свойства для силовых кабелей, монтаж и эксплуатация которых осуществляется путем открытой прокладки, расположенных в пределах легкого доступа (размещенных в распределительном щите, шкафах управления, и т.д.), а также для обмоток высоковольтных двигателей, так как для них периодически проводится диагностика состояния изоляции. Термоиндикаторы могут добавляться в качестве красителей в поверхностный слой изоляции на стадии изготовления кабелей или наноситься в виде краски на поверхность изоляции готовых высоковольтных обмоток. Выбор термоиндикаторного материала должен осуществляться в зависимости от температуры технологической обработки изоляционного материала, соответствия пороговой температуры термоиндикатора контролируемой предельной температуре изоляции, а также применимостью для конкретного типа изоляционного материала.

Практическая возможность реализации данного подхода показана в разработанной авторами конструкции кабеля, содержащего поверхностный слой полимерной изоляции с добавлением специальных термоиндикаторных добавок, изменяющих свой цвет при определенной температуре. При этом обеспечивается изменение цвета кабельного изделия при недопустимом перегреве и в то же время не ухудшаются механические и электрические свойства изоляции.

Разработанная конструкция способствует повышению надежности и энергообеспечения благодаря быстрому и точному определению перегрева изоляции и последующей замене кабельного изделия во избежание аварийного отключения или отказа электрооборудования. Таким образом, визуализация критического нагрева даст возможность избежать экономических потерь от остановки и вынужденного простоя электрооборудования и устранения его последствий. К тому же наличие подобных перегревов может свидетельствовать о неисправностях в электрической цепи. В этом случае важно выяснить причину появления перегрева и устранить ее.

Таким образом, контроль теплового состояния электрической изоляции силовых кабелей, обмоток электрических двигателей с использованием термоиндикаторов является инновационным техническим предложением в плане обеспечения безопасности, повышения энергоэффективности и надежности электроизоляционных систем и электрооборудования.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ**

Прокопенко А.О.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Одной из основных тенденций развития современного машиностроения является внедрение в технологический процесс производства мехатронных технологических машин и роботов. Мехатронный подход в построении машин нового поколения заключается в переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным компонентам, которые легко перепрограммируются в новую задачу и при этом имеют относительно низкую стоимость.

Мехатронный подход к проектированию предполагает не расширение, а именно замещение функций, традиционно выполняемых механическими элементами системы на электронные и компьютерные блоки.

Понимание принципов построения интеллектуальных элементов мехатронных систем, методов разработки алгоритмов управления и их программной реализации является необходимым условием для создания и внедрения мехатронных технологических машин.

Основной тенденцией в развитии современной промышленности являются интеллектуализация производственных технологий на базе использования мехатронных технологических машин и роботов. Во многих областях промышленности мехатронные системы (МС) приходят на смену традиционным механическим машинам, которые уже не соответствуют современным качественным требованиям.[1]

Мехатронный подход в построении машин нового поколения заключается в переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным компонентам, которые легко перепрограммируются под новую задачу и при этом являются относительно дешевыми. Мехатронный подход к проектированию технологических машин предполагает замещение функций, традиционно выполняемых механическими элементами системы на электронные и компьютерные блоки. Еще в начале 90-х годов прошлого века подавляющее большинство функций машины реализовывалось механическим путем, в последующие десятилетие происходило постепенное вытеснение механических узлов электронными и компьютерными блоками.

В настоящее время в мехатронных системах объем функций распределен между механическими, электронными и компьютерными компонентами практически поровну. К современным технологическим машинам предъявляются качественно новые требования:

- сверхвысокие скорости движения рабочих органов;
- сверхвысокая точность движений, необходимую для реализации нанотехнологий;
- максимальную компактность конструкции;
- интеллектуальное поведение машины, функционирующей в изменяющихся и неопределенных средах;
- реализацию перемещений рабочих органов по сложным контурам и поверхностям;
- способность системы к реконфигурации в зависимости от выполняемой конкретной задачи или операции;
- высокую надежность и безопасность функционирования.

Все эти требования можно выполнить только с использованием мехатронных систем. Мехатронные технологии включены в число критических технологий Российской Федерации.

В последние годы создание технологических машин четвертого и пятого поколений с мехатронными модулями и интеллектуальными системами управления получило развитие и в нашей стране.

К таким проектам следует отнести мехатронный обрабатывающий центр МС-630, обрабатывающие центры МЦ-2, Гексамех-1, робот-станок РОСТ-300.

Дальнейшее развитие получили мобильные технические роботы, которые могут самостоятельно передвигаться в пространстве и обладают способностью выполнять технологические операции. Примером таких роботов могут служить роботы для применения в подземных коммуникациях: РТК-100, РТК-200, РТК «Рокот-3».[2]

К главным преимуществам мехатронных систем относятся:

- исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации, упрощение кинематических цепей и, следовательно, высокая точность и улучшенные динамические характеристики машин и модулей;
- конструктивная компактность модулей;
- возможность объединения мехатронных модулей в сложные мехатронные системы и комплексы, допускающие быструю реконфигурацию;
- относительно низкая стоимость установки, настройки и обслуживания системы благодаря модульности конструкции, унификации аппаратных и программных платформ;
- способность выполнять сложные движения за счет применения методов адаптивного и интеллектуального управления.

Примером такой системы может служить система регулирования силового взаимодействия рабочего органа с объектом работ при механообработке, управление технологическими воздействиями (тепловыми, электрическими, электрохимическими) по объекту работ при комбинированных методах обработки; управление вспомогательным оборудованием (конвейерами, загрузочными устройствами).[3]

В процессе движения механического устройства рабочий орган системы непосредственно воздействует на объект работ и обеспечивает качественные показатели выполняемой автоматизированной операции. Таким образом, механическая часть является в МС объектом управления. В процессе выполнения МС функционального движения внешняя среда оказывает возмущающее воздействие на рабочий орган, который является конечным звеном механической части. Примерами таких воздействий могут служить силы резания в операциях механообработки, контактные силы и моменты сил при формообразовании и сборке, сила реакции струи жидкости при операции гидравлической резки.

Кроме рабочего органа в состав МС входит блок приводов, устройств компьютерного управления, верхним уровнем для которого является человек-оператор, либо другая ЭВМ, входящая в компьютерную сеть; сенсоры, предназначенные для передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии блоков машины и движения МС.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- организация управления функциональными движениями МС;
- управление процессом механического движения мехатронного модуля в реальном времени с обработкой сенсорной информации;
- взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс;
- организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.[4]

Мехатронные технологии оказывают и будут еще больше оказывать влияние на социальные условия жизни населения, что связано как с интеллектуализацией условий

труда и быта, повышением качества и комфортности транспортных средств, повышением качества медицинского обслуживания, так и с сокращением рабочих мест. Отсюда последуют и структурные изменения в экономике.

Мехатроника - наука будущего, включающая в себя комплекс идей, методов и средств для создания компьютерно-контролируемых и программируемых механических систем с заданными функциями, имеющим энергетические (в том числе информационные) и силовые взаимодействия с окружающей средой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гераськин Д.П. Принципы автоматизации механических систем. – М.: Сыкт. лесн. ин-т, 2011. – 10с.
2. Глебов Н.А. Элементы мехатроники. – Новочеркасск: ЮРГТУ. – 2006.
3. Справочно – информационный портал «Все для учебы». Основы мехатроники/Письменные лекции. URL: <http://www.studfiles.ru/> (дата обращения 19.10.2014).
4. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. - 2000. - №1. - С.5-10.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИВОДА МАЛОМОЩНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗГОНЕ И ТОРМОЖЕНИИ

Морозова М. П., Чернышева А. Е., Бегеза М.В.

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

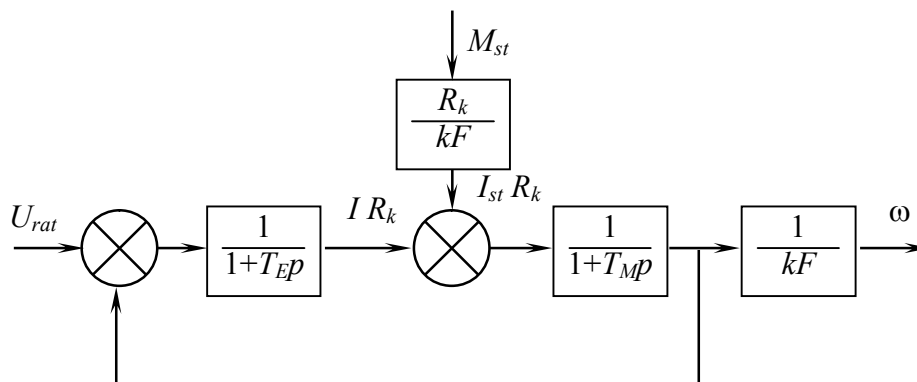
Как известно, для получения параметров настроек контура регулирования стабилизации частоты вращения требуется знать динамические характеристики объекта управления. В качестве объекта управления выступает маломощный двигатель постоянного тока с независимым возбуждением ДПР-42-Ф1-02. Датчиком частоты являлся практически такой же двигатель в режиме генератора, который жестко соединен с валом ведущего двигателя.

В качестве управляющей системы в контуре выступает Arduino. Напряжение с генератора через делитель для согласования диапазона подключено на АЦП вход микроконтроллера. В свою очередь PWM выход контроллера через силовой драйвер формирует напряжение для двигателя.

В литературе, чаще всего встречается структура динамики двигателя (рисунок 1), из которой можно получить передаточную характеристику двигателя постоянного тока при моменте сопротивления  $Mst$  равном нулю как

$$W(s) = \frac{k_1}{T_E T_M s^2 + T_M s + 1},$$

где  $s$  – оператор Лапласа,  $T_E$ ,  $T_M$  – соответственно электрическая и механические постоянные.



**Рис. 1.** Структурная схема двигателя постоянного тока

Проведенные эксперименты показали об наличии существенных нелинейных свойств в динамике микромощного электропривода.

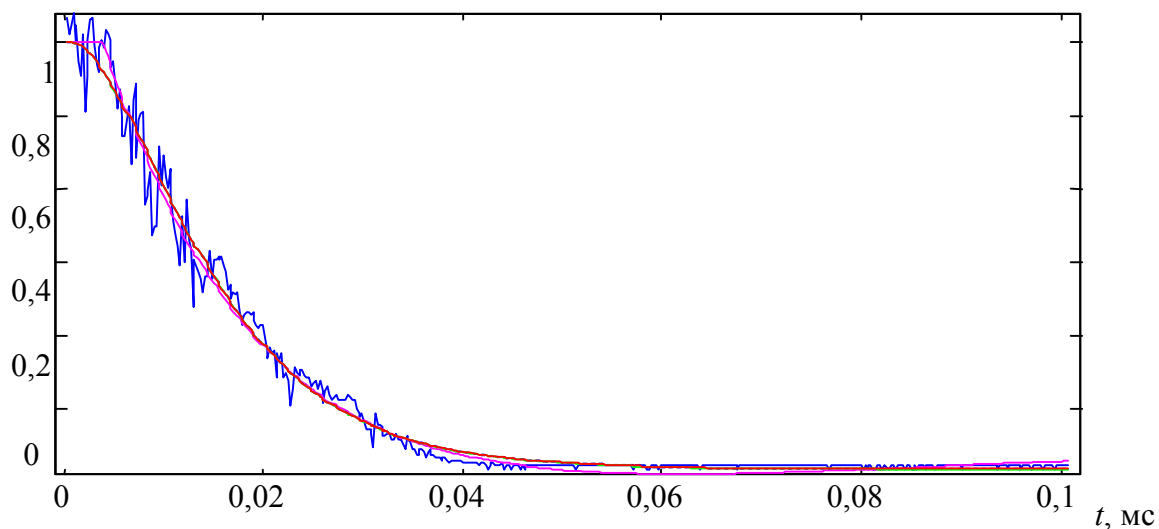
Согласно программе микроконтроллер формировал меандровый сигнал с частотой для выхода частоты выходить на стационарное значение. Кривые торможения и разгона фиксировались с помощью цифрового осциллографа (рис. 2-5).

Результаты эксперимента пытались аппроксимировать рядом передаточных функции с запаздыванием получив общий вид теоретического решения от реакции передаточной функции на единичный скачек.

$$W_1(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{T_1}\right) - C_2 \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{T_2}\right) - C_3 \exp\left(\frac{-(t-\tau)}{T_3}\right) \right);$$



**Рис. 2.** Кривая торможения и результат ее аппроксимации

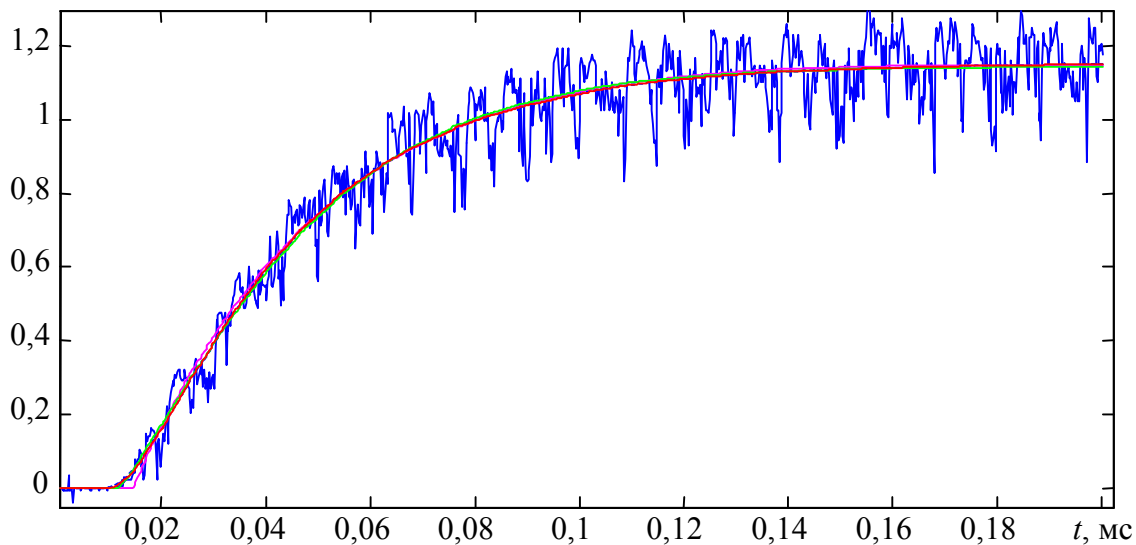


Рис. 3. Кривая разгона и результат ее аппроксимации

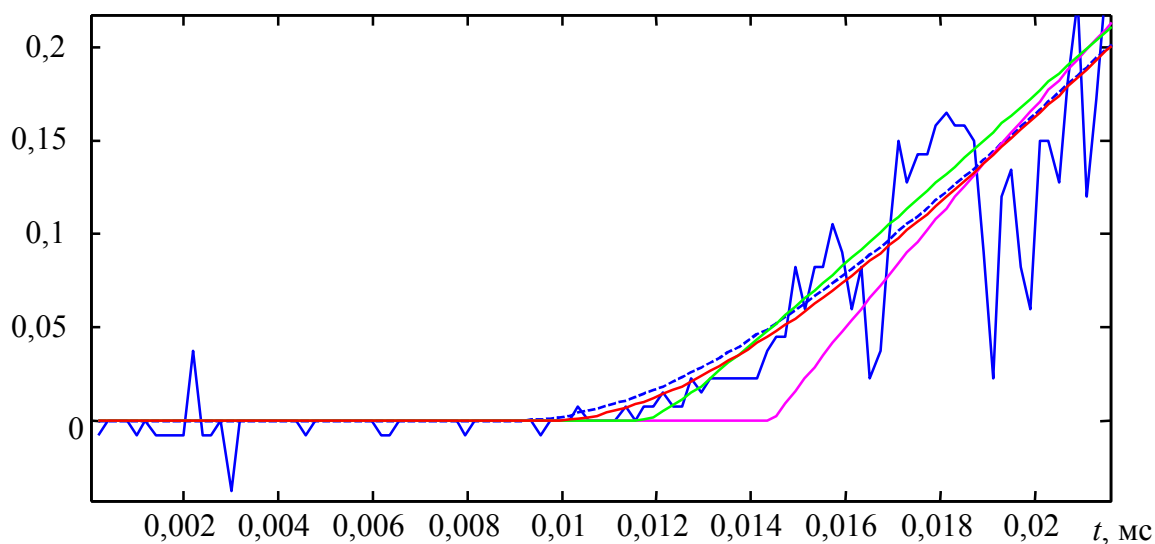


Рис. 5. Кривая разгона и результат ее аппроксимации (начальный участок)

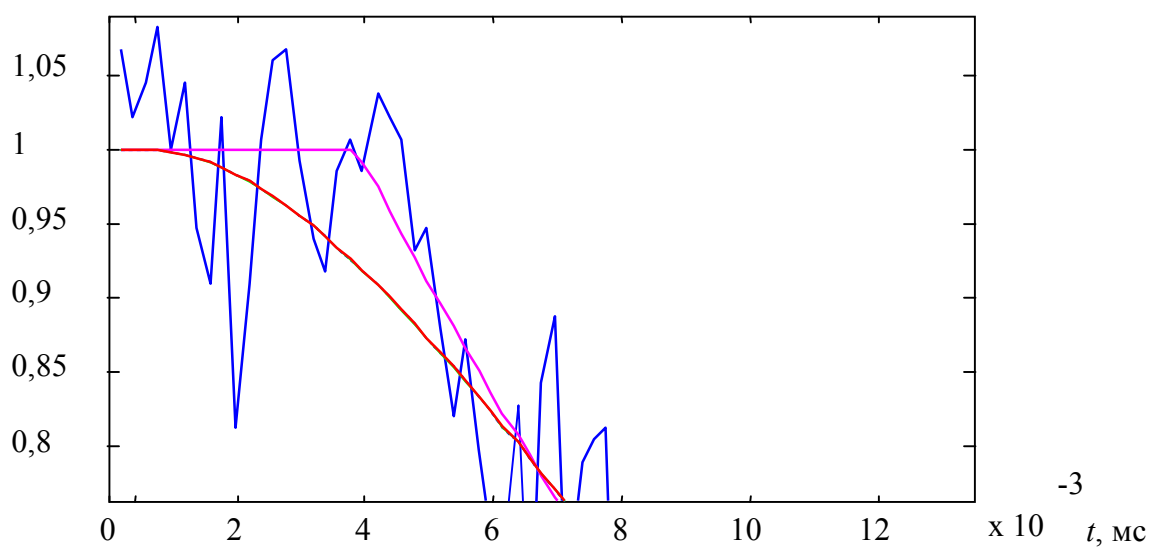


Рис. 4. Кривая торможения и результат ее аппроксимации (начальный участок)

$$W_2(s) = \frac{k(T_3s + 1)\exp(-\tau s)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right),$$

$$W_3(s) = \frac{k(T_3s + 1)\exp(-\tau s)}{(T_1s + 1)^2(T_2s + 1)}$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - (C_2 + bt) \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right),$$

$$W_4(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)},$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right),$$

где  $C_1, C_2, b$  – коэффициенты определяемые через  $T_1, T_2, T_3$ .

Используя алгоритм минимизации среднеквадратичного отклонения (СКО) были найдены оптимальные коэффициенты для передаточной функции (табл.1.–2).

Как визуальный анализ, так и математический результат показывают об существенных отличиях в динамике объекта управления при увеличении частоты и уменьшении. С хорошей точностью (особенно кривая торможения) динамику аппроксимируется характеристика апериодическими звеньями 2-3 порядка, однако общая динамика более сложна. Наибольшие погрешности наблюдаются на начальном участке (рисунок 4-5), особенно для кривой разгона.

**Таблица 1.** Результаты для кривой разгона

Модель	k	T <sub>1</sub> , мс	T <sub>2</sub> , мс	T <sub>3</sub> , мс	τ, мс	СКО·10–3
W1	1,16	31,0	0,869	7,64	8,37	5,92
W2	1,15	62,4	42,4	75,1	14,4	5,98
W3	1,13	0,552	21,6	8,43	11,5	5,96
W4	1,16	31,6	6,89	-	9,65	5,92

**Таблица 2.** Результаты для кривой торможения

Модель	k	T <sub>1</sub> , мс	T <sub>2</sub> , мс	T <sub>3</sub> , мс	τ, мс	СКО
W1	1,16	7,87	0,0699	7,68	0,543	653,18
W2	1,15	56,7	16,2	71,1	3,88	605,10
W3	1,13	8,05	8,04	8,55	0,597	652,91
W4	1,16	7,79	7,77	-	0,613	653,14

Сильнее всего изменяется механическая составляющая динамики и время запаздывания, что связано, скорее всего, с нелинейным влиянием сил трения и силового драйвера схемы.



## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПОВЕРКА ПРУЖИННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Бабичев А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Давление является одним из важнейших параметров химико-технологических процессов. От величины давления часто зависит правильность процесса производства.

Давление определяется отношением силы, равномерно распределенной по площади и нормальной к ней, к величине этой площади. Различают абсолютное и избыточное давления. Под абсолютным давлением ( $P_{абс}$ ) аппарата понимают давление жидкости или газа на его стенки. Разность между абсолютным ( $P_{абс}$ ) и атмосферным ( $P_{атм}$ ) давлениями, т.е. давлением окружающей среды, называется избыточным давлением  $P_{изб}$ , причем под абсолютным нулем понимают давление в сосуде, из которого полностью выкачан воздух. Приборы, служащие для измерения давления, называются манометрами. По принципу действия различают следующие приборы для измерения давления: жидкостные, пружинные, поршневые, электрические и радиоактивные.

*Жидкостные приборы.* В этих приборах измеряемое давление или разрежение уравнивается гидростатическим давлением столба рабочей жидкости, в качестве которой применяется спирт и др. Существует несколько конструктивно отличающихся друг от друга видов жидкостных приборов: двухтрубный U-образный манометр, однотрубный чашечный манометр или манометр с наклонной трубкой. Он используется для измерения давления до 2-3 кгс/см<sup>2</sup> при проверочных, наладочных и научно-исследовательских работах.

*Пружинные приборы.* В этих приборах измеряемое давление или разрежение уравнивается силами упругого противодействия различных чувствительных элементов (трубчатые пружины, мембраны, сильфоны и т.п.), деформация которых, пропорциональная измеряемому параметру, передается посредством системы рычагов на стрелку или перо прибора. При снятии давления чувствительный элемент вследствие упругой деформации возвращается в свое первоначальное положение. Благодаря простоте и надежности конструкции, наглядности показаний и широким пределам измерения пружинные приборы нашли широкое применение для измерения и регистрации давления и разрежения.

*Поршневые манометры.* В этих приборах измеряемое давление определяется по величине нагрузки, действующей на поршень определенной площади, перемещаемой в заполненном маслом цилиндре. Поршневые манометры имеют высокий класс точности, равный 0,02; 0,05; 0,2, в поэтому они обычно применяются для поверки других видов манометров.

*Электрические приборы.* Действие этих приборов основано на измерении электрических свойств (сопротивления, емкости, индуктивности и т.п.) некоторых металлов при воздействии на них внешнего давления.

*Пьезоэлектрические приборы.* В этих приборах используется пьезоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварц, сегнетова соль, турмалин) при приложении к ним силы в определенном направлении.

*Радиоактивные приборы.* В этих приборах измеряемое давление определяется измерением степени ионизации, производимой излучениями и рекомбинацией ионов.

Три последние группы приборов применяются для измерения давления при измерении быстроменяющихся давлений и очень высоких давлений (десятки тысяч атмосфер).

В настоящее время на предприятиях химической промышленности наибольшее распространение получили пружинные и электрические приборы для измерения давления, разрежения, абсолютного давления и перепада давления.

**Пружинные манометры.** По виду чувствительного элемента деформационные приборы делятся на следующие группы: приборы с трубчатой пружиной, мембранные приборы, у которых упругим элементом служит мембрана, анероидная или манометрическая коробка; пружинно-мембранные с гибкой мембраной; приборы с упругой мембраной (сильфоном); пружинно-сильфонные.

В этих приборах измеряемое давление или разрежение уравнивается силами упругого противодействия различных чувствительных элементов (трубчатой пружины, мембраны, сильфона и т.п.), деформация которых, пропорциональная измеряемому параметру, передается посредством системы рычагов на стрелку или перо прибора. При снятии давления чувствительный элемент вследствие упругой деформации возвращается в свое первоначальное положение. Благодаря простоте и надежности конструкции, наглядности показаний и широким пределам измерения пружинные приборы нашли широкое применение для измерения и регистрации давления и разрежения.

**Электрические манометры.** Действие приборов этой группы основано на прямом или косвенном преобразовании давления в электрический параметр, функционально связанный с давлением. Примером электрических манометров служат преобразователи серии «Сапфир» и заменяющей их серии «Метран». Датчики давления серии Метран предназначены для измерения и непрерывного преобразования в унифицированный аналоговый токовый сигнал следующих выходных величин:

- избыточного давления (Метран – ДИ);
- абсолютного давления (Метран – ДА);
- разряжения (Метран - ДВ);
- давления-разряжения (Метран - ДИВ).

**Описание лабораторной установки.** На лабораторном стенде «Проверка и калибровка датчиков давления в лабораторных условиях», можно осуществлять проверку и калибровку датчиков давления различных типов.

В рамках лабораторной работы проводится проверка пружинных датчиков давления МТП-160 и ЭКМ – 1У. Стенд состоит из редуктора, задающего величину давления, манометра, показывающего работу пружинного измерительного механизма, поверяемого пружинного манометра МТП-160, образцового манометра, и поверяемого электроконтактного манометра ЭКМ – 1У.

**Описание работы стенда.** Для создания давления используется источник давления, представленный компрессором, нагнетающим давление воздуха. Из компрессора через задатчик 1 воздух подается на поверяемые датчики и эталонный датчик давления (Рис.1). В качестве поверяемых датчиков используются: манометр технический пружинный с верхним пределом измерения  $1,6 \text{ кгс/см}^2$  (МТП-160) – 3; для наглядности работы пружинных манометров представлен датчик МТП-160 без верхней крышки – 2; электроконтактный манометр с верхним пределом измерения  $1 \text{ кгс/см}^2$  и одной уставкой (перемещаемым по шкале контактом) (ЭКМ – 1У) – 5. В качестве эталонного датчика используется Манометр измерительный (МИ) – 4 с верхним пределом измерения  $1 \text{ кгс/см}^2$  и классом точности 0,4.

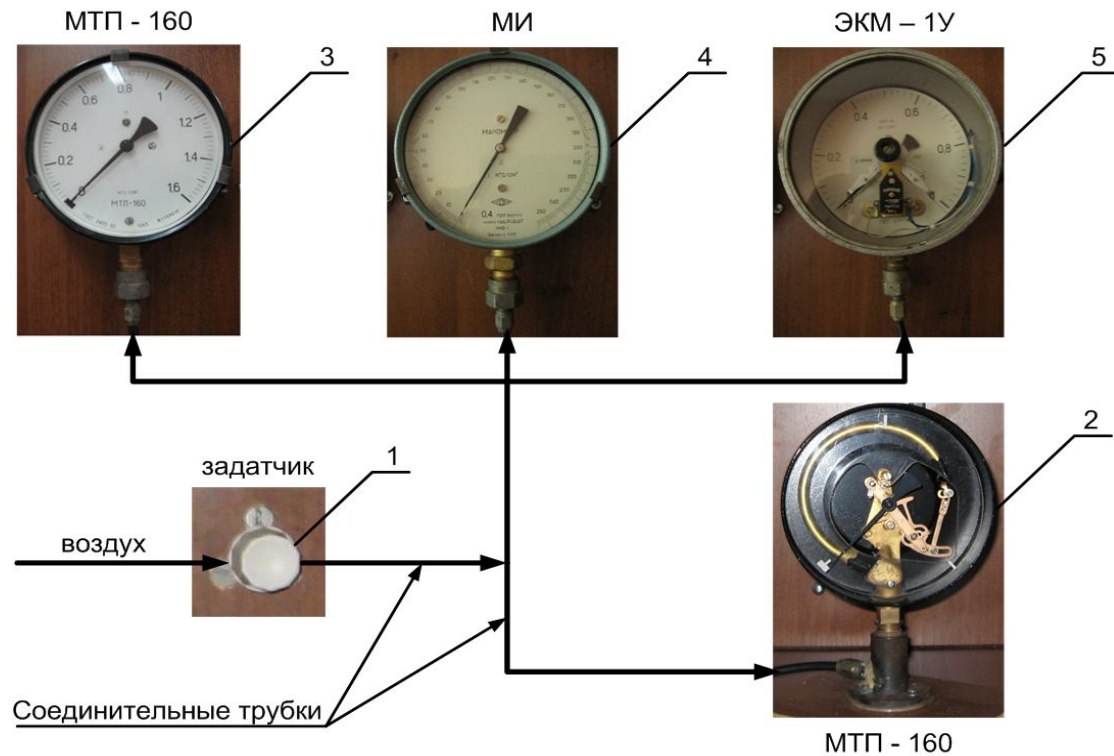


Рис. 1. Функциональная схема стенда

#### Порядок снятия характеристик:

1. Ознакомиться с принципом действия, конструкцией датчика давления.
2. Перед началом проведения поверки необходимо убедиться в герметичности системы. Для этого проводится внешний осмотр стенда на предмет утечки воздуха.
3. Если значение давления превышает нулевое значение, то необходимо с помощью задатчика изменить его значение на нулевое. Затем установить первое поверяемое значение.
4. Показания поверяемого прибора занести в таблицу опытных данных при достижении показаний эталонного прибора заданным значениям.
5. Выполнить поверку оставшихся значений давления при прямом ходе путем постепенного добавления давления воздуха с помощью задатчика (см. рис. 1).
6. Выдержать поверяемый прибор на предельном значении давления в течение 3 минут и провести поверку датчика при тех же значениях давления при обратном ходе, постепенно уменьшая давление воздуха.
7. При понижении давления необходимо, чтобы стрелка подходила к контрольной точке справа, и не опускалась ниже контрольной точки до снятия показаний.
8. Результаты измерений при прямом и обратном ходе записать в таблицу данных.
9. Рассчитать абсолютную погрешность, приведенную относительную погрешность, вариацию показаний датчика.
10. Заполнить табл. 2.
11. Составить отчет о проведенной работе, который должен в себе содержать:
  - название темы лабораторной работы;
  - цель работы;
  - схему поверяемого прибора;
  - схему установки для поверки прибора;
  - вывод о проделанной работе.

### **Обработка результатов поверки**

По результатам поверки необходимо:

1. Сделать заключение о пригодности датчика к эксплуатации с указанием датчика, его типа, модели, класса точности, диапазона измерения.
2. Обосновать сделанное заключение в соответствии с методикой проведения проверки.
3. Построить график зависимости погрешности датчика от давления.

Заключение:

В ходе работы был собран лабораторный стенд для изучения датчиков давления. Были изучены датчики давления, а именно принцип их действия и область применения. Датчики давления находят широкое применение в системах управления технологическими процессами, так как давление один из важнейших параметров многих производственных циклов. Датчики давления могут измерять абсолютное, дифференциальное и относительное давление в различном диапазоне. Активное применение датчики давления нашли практически во всех отраслях современной промышленности: например, в энергетике. Подробно были рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности при работе на лабораторных установках.

Практика была познавательной, так как был получен опыт работы с датчиками давления, а также со многими другими приборами и установками которые были использованы в результате сборки стенда.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. [Электронный ресурс] //http://tpu.ru/structure
2. [Электронный ресурс] //http://tpu.ru/today/tpu-structure/instituty-fakultety-kafedry/enin/lab-enin/
3. [Электронный ресурс] //http://domdobriy.ru/?page=history
4. [Электронный ресурс] //http://domdobriy.ru/?page=depinf&dep=EPEO
5. М.В. Коломоец “Исследование датчиков давления и их применение”

## **ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Ямалов И.И.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Микропроцессорные системы зажигания (МПСЗ) широко применяются в малых транспортных средствах, что обусловлено рядом их достоинств, таких как: высокие энергетические характеристики и надежность при минимальных массогабаритных показателях. Системы зажигания являются одной из наиболее ответственных частей комплекса электрооборудования двигателей внутреннего сгорания, что определяет ряд жестких требований, предъявляемых к ним. К этим требованиям относятся: энергоэффективность, стабильность работы, экономичность, высокая энергия искровых разрядов и др[1].

Для соответствия данным требованиям и улучшения выходных характеристик МПСЗ необходимо решить ряд научно-технических задач.

Одна из таких задач – уменьшение частоты вращения двигателя внутреннего сгорания начала искрообразования. Множество современных малых транспортных средств, с целью удешевления и упрощения конструкции, комплектуются без

аккумуляторных батарей, что обуславливает сложность ручного запуска двигателя внутреннего сгорания в условиях низких температур.

Решением проблемы начала искрообразования в МПСЗ является применение независимого формирователя импульсов совместно с микропроцессорной системой зажигания емкостного типа.

В настоящее время остро стоит проблема экономичности транспортных средств. Стремление повысить топливную экономичность двигателей предполагает использование обедненной смеси, для надежного воспламенения которой необходима большая энергия искровых разрядов. К тому же, момент зажигания характеризуется углом опережения зажигания. Отклонение от оптимального угла опережения зажигания приводит к уменьшению топливной экономичности двигателя.

Одним из возможных путей решения указанной проблемы экономичности является применение МПСЗ, включающей в себя следующие взаимосвязанные системы:

- система заряда, спроектированная с использованием полупроводниковых приборов, работающих в качестве управляемых ключей, служащих для прерывания тока в первичной обмотке катушки зажигания;
- система разряда, спроектированная с использованием тиристоров, служащих для разряда накопительного конденсатора;
- система управления, состоящая из микроконтроллера и датчиков положения ротора, обеспечивающих функцию управления по оптимальной кривой углов опережения зажигания.

Так же на сегодняшний день очень актуальна проблема импортозамещения. По результатам анализа, проведенного Минпромторгом в июне 2014 года доля импорта в электронной промышленности составляет 80-90% . Вследствие этого особо важна разработка высокоэффективных систем зажигания автономных объектов на отечественной элементной базе.

Микропроцессорные системы зажигания (МПСЗ) широко применяются в малых транспортных средствах, что обусловлено рядом их достоинств, таких как высокие энергетические характеристики и надежность при минимальных массогабаритных показателях. Системы зажигания являются одной из наиболее ответственных частей комплекса электрооборудования двигателей внутреннего сгорания, что определяет ряд жестких требований, предъявляемых к ним. К этим требованиям относятся: энергоэффективность, стабильность работы, экономичность, высокая энергия искровых разрядов и др

На рис. 1 изображена структурная схема микропроцессорной системы зажигания.

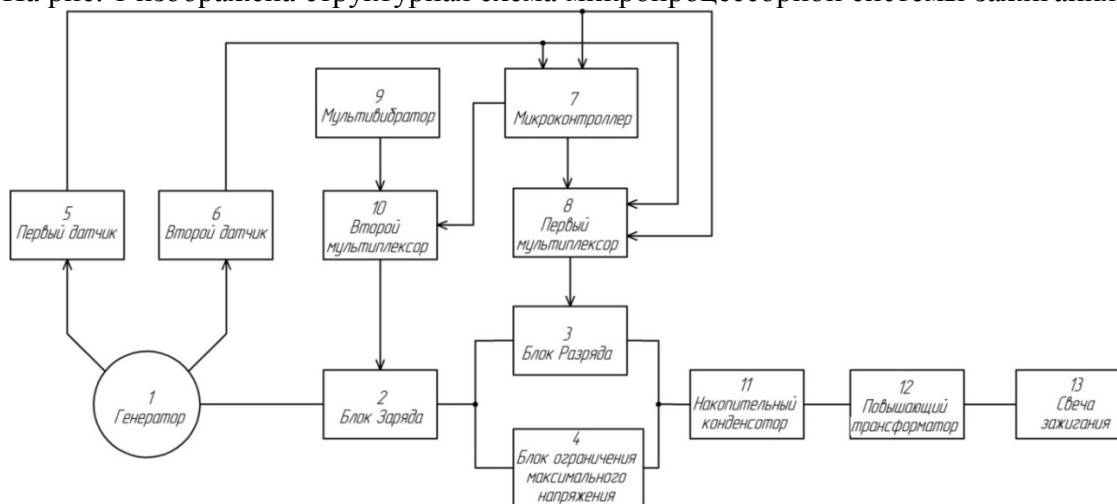


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорной системы зажигания

Микропроцессорная система зажигания для снегохода содержит [ ] (см. рис. 4.1) генератор 1, связанный с блоком заряда 2, который соединен с блоком разряда 3 и блоком ограничения максимального напряжения 4. Первый датчик 5 и второй датчик 6 установлены на генераторе 1 и связаны с микроконтроллером 7. Микроконтроллер 7 и первый и второй датчики связаны через первый мультиплексор 8 с блоком разряда 3, а управляющие выходы мультивибратора 9 и микроконтроллера 7 соединены через второй мультиплексор 10 с управляющими входами блока заряда 2. Блок разряда 3 и блок ограничения максимального напряжения 4 связаны с накопительным конденсатором 11, выход которого через повышающий трансформатор 12 соединен со свечей зажигания 13.

Устройство работает следующим образом. На низкой частоте вращения двигателя заряд накопительного конденсатора осуществляется многократным прерыванием тока короткого замыкания в обмотке зажигания полевым транзистором. В диапазоне частот вращения двигателя от 0 до 800 об/мин полевым транзистором управляет мультивибратор 9 из-за недостаточного уровня напряжения питания для функционирования микроконтроллера 7. Разряд накопительного конденсатора 11 осуществляется путем замыкания его выводов на повышающий трансформатор 12 посредством тиристора, управление которым в диапазоне частот вращения двигателя от 0 до 800 об/мин осуществляется первым или вторым датчиком, в зависимости от направления вращения, а в диапазоне от 800 об/мин и выше – микроконтроллером.

Первый и второй датчики являются магнитоэлектрическими. Угол между датчиками составляет  $70^\circ$ . Ротор генератора выполняется с метками шириной  $54^\circ$ . При прохождении метки на выводах магнитоэлектрического датчика выделяется импульс. Микроконтроллер по импульсам с датчиков определяет скорость и направление вращения двигателя внутреннего сгорания. Микроконтроллер, благодаря заложенной в него кривой угла опережения зажигания регулирует время разряда накопительного конденсатора, а так же в зависимости от частоты вращения двигателя подбирает оптимальную скважность импульсов управления блока заряда. Блок ограничения максимального напряжения выполнен на тиристоре и прецизионных токоограничительных резисторах и не допускает увеличения напряжения выше максимального допустимого напряжения накопительного конденсатора. Реверсирование вращения осуществляется по команде с кнопки. Микроконтроллер при поступлении сигнала реверса снижает обороты вращения двигателя до безопасного уровня и дает сигнал разряда таким образом, чтобы коленчатый вал начал вращаться в обратном направлении. В целях защиты от случайного нажатия во время движения микроконтроллер воспринимает сигнал реверса только на холостых оборотах двигателя.

На кафедре электромеханика УГАТУ были проведены экспериментальные исследования макетного образца МПСЗ. А именно: экспериментальные исследования влияния частоты коммутации напряжения генератора на заряд накопительного конденсатора [2] и исследования влияния емкости накопительного конденсатора на напряжение в первичной цепи обмотки зажигания и тока разряда [3]. Полученные данные согласуются с результатами математического [4] и имитационного моделирования.

Разработана высокоэффективная микропроцессорная система зажигания (МПСЗ) для автономных объектов (снегоходы, водные мотоциклы, моторные лодки и т.п.), в которой углом опережения зажигания управляет микропроцессорный элемент, а устойчивое искрообразование достигается при низкой частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гизатуллин, Ф.А. Емкостные системы зажигания / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т.– Уфа, 2002.–249с.
2. Султангалеев Р. Н., Полихач Е. А., Ямалов И. И., Фаррахов Д. Р. Исследование влияния частоты коммутации напряжения генератора на малых оборотах работы системы зажигания // Вестник УГАТУ. –2012.– Том 16, № 8(53).
3. Ямалов И.И. и др. Исследование искрообразования в микропроцессорной системе зажигания // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник; Уфимск. гос. авиац. ун - т. – Уфа: УГАТУ. – 2012.
4. Исмагилов Ф.Р., Султангалеев Р. Н., Полихач Е. А., Ямалов И. И., Фаррахов Д. Р. Математическая модель переходных процессов заряда и разряда конденсатора в емкостной системе зажигания для мототехники // Вестник УГАТУ. –2014.– Том 18, № 1(62).

## **ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКАХ РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ**

Ершов И.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Основным источником выработки электрической энергии переменной частоты являются синхронные генераторы (СГ). В настоящее время около 80% установленных СГ на электростанциях находятся в эксплуатации более 20 лет. В связи с таким сроком службы число повреждения в обмотках ротора СГ резко возрастает. Основным таким источником повреждениям является витковые замыкания.

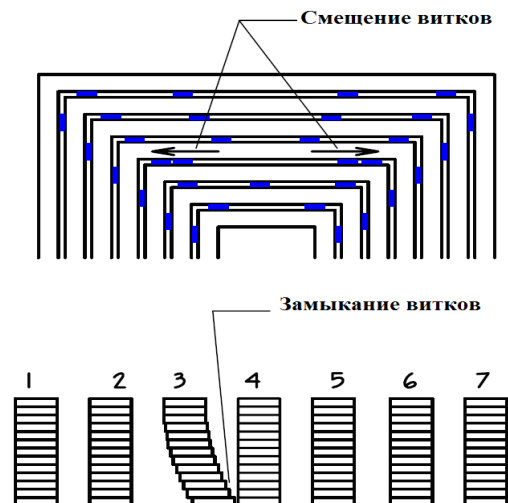
Возникновение виткового замыкания в обмотках ротора вызывают неравномерное распределения механической нагрузки на вал ротора, что в свою очередь становится причиной вибрации всего агрегата и с последующими авариями.

Относительное смещение витков может ухудшить изоляционный слой, которое может привести в свою очередь к витковому замыканию. Металлическая грязь также может привести к витковым замыканиям, образуя проводящие мостики между витками.

Изменение формы обмотки относится к явлению, где длина медного витка увеличивается в пазу ротора вследствие нестабильности работы генератора. Медь в пазах ротора расширяется в результате нагрева во время работы генератора.

В результате постоянных температурных изменений внутри обмотки происходит трение между витками за счет изменение длины витка. Если прочность на сжатие обмотки ротора превышена, то медь в пазе может деформироваться. Удлинение стяжки является результатом чрезмерного трения между витками и бандажным кольцом изоляции. Когда ротор разгоняется до нормальной рабочей скорости и температуры, диаметр крепежных колец увеличится [1].

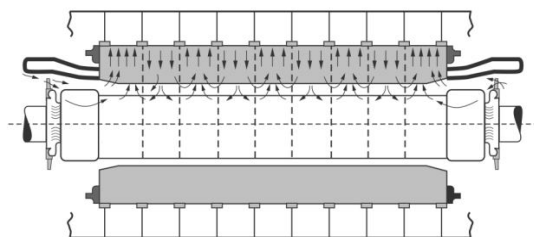
Проблема с системой охлаждения роторов СГ является засорение вентиляционных каналов. В роторах СГ, медь находится в непосредственном контакте с воздухом или охлаждающим водородом. Обычно пазы ротора имеют вентиляционные каналы для свободного прохождения охлаждающего водорода или воздуха. Смещение витков в обмотке ротора приводит к предотвращению нормального течения охлаждающего газа, что нарушает тепловой баланс СГ, как показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Замыкание витков из-за смещения

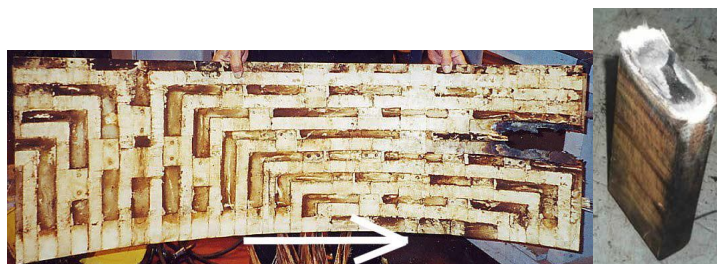
Еще одной причиной возникновения виткового замыкания является появление влаги внутри обмотки ротора СГ. На рис. 2 показана упрощенная схема вентиляции СГ. При такой схеме охлаждении между витками возможно скопление грязи и влаги.

Загрязняющие вещества наталкиваются на внутреннюю поверхность изоляции за счет центробежных сил. Влага, содержащаяся в охлаждающем газе, будет поглощать загрязняющие вещества, которые в свою очередь могут создать проводящий мостик между витками.



**Рис. 2.** Схема вентиляции

На рис. 3 показан эффект загрязнения обмотки. Данная обмотка имела витковое замыкание и является внутренним слоем изоляции от генератора с воздушным охлаждением. Аналогичные условия наблюдается в генераторах с водородным охлаждением. Светлоокрашенные районы – контуры торцевых обмоток и блоков, а темные области – загрязнения, центрифуга действовала на поверхность стопорного кольцо изоляции [2].



**Рис. 3.** Загрязненная часть обмотки



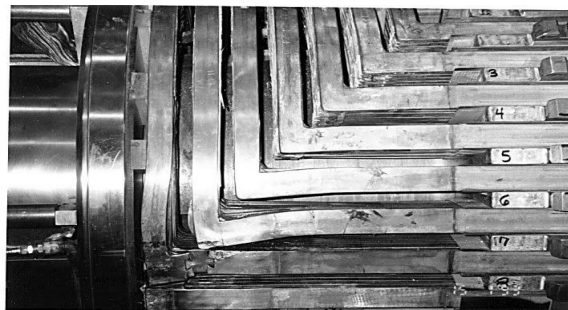
Последствия витковых замыканий могут быть различными:

**Вибрация.** В двухполюсных роторах вибрация происходит из-за неравномерного нагрева поковки ротора. Витковые замыкания могут вызвать неравномерное распределение всех витков между полюсами, количество тепла между полюсами становится также неравномерным. Такое неравномерное нагревание искривляет ось ротора и тем самым становится причиной вибрации. Если ротор испытывает вибрацию, то причиной ее возникновения и становится неравномерное распределение работающих витков в обмотках. Вибрация в четырехполюсном роторе обусловлена в первую очередь магнитным дисбалансом. В отличие от двухполюсных роторов, где весь магнитный поток в поковке ротора остается симметричным, четыре полюса не будут поддерживать симметрию при наличии короткозамкнутых витков. Небольшое содержание короткозамкнутых витков приведет к индуцированной вибрации [3].

**Ограниченная работа генератора.** Системы возбуждения генератора имеют определенную избыточную мощность. Тем не менее, обмотки роторов с многочисленными короткозамкнутыми витками, требуют снижения нагрузки порядка одного МВт (или МВар) в год. В случаях, когда требуется снижение нагрузки, при наличии короткозамкнутых витков порядка 5-10% и более, то такие СГ нуждаются к перемотке ротора при первой же возможности.

**Увеличение тока возбуждения.** Выработка электроэнергии генератора находится в прямой зависимости от количества витков в обмотках ротора. Любое сокращение количества витков в обмотке потребует соответствующего увеличения тока возбуждения в целях поддержания уровня напряжения на статоре. От этого увеличения тока возбуждения зависит и стоимость для производителя электроэнергии. Кроме того, увеличение тока возбуждения увеличит и температуру изоляции в обмотках ротора. Увеличение температуры в роторе ускорит процесс разрушения системы изоляции и увеличивает эффект деформации обмоток [4].

**Повреждение бандажного кольца.** Самое серьезное состояние, вызванное витковым замыканием это повреждения бандажного кольца. В этом случае верхний виток одной обмотки входит в контакт с верхним витком смежной обмотки. При этом дуга будет гореть через бандажное кольцо и вызывать дефект в самом бандажном кольце. Конструктивный дефект бандажного кольца является очень серьезным повреждением, требующего немедленного отключения в связи с опасностью для персонала станции. Рис. 4 представляет собой фотографию виткового замыкания между витками 6 и 7 [5].



**Рис. 4.** Деформация витков в обмотке

**Выводы:**

При длительной работе синхронного генератора возникает такое явление, как витковое замыкание, обусловленное рядом причин, таких как постоянные температурные изменения, загрязнение обмотки, появление влаги.

Вследствие потенциальной опасности возникновения виткового замыкания как для самой электрической машины, так и для обслуживающего персонала, разработка системы диагностики для такого рода повреждения крайне необходима.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27905.1-88. Системы электрической изоляции электрооборудования. Оценка и классификация.
2. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы: Аварии и инциденты. Техническое пособие. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 488с.
3. Полищук В.И. Развитие теории построения защит ротора синхронного генератора от витковых замыканий: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2007. – 149 с.
4. Хазан С.И. Турбогенераторы: Повреждения и ремонт / под ред. Устинова П.И. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983, – 520 с.
5. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов. – Л.: Наука, 1989. – 119 с.

### МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ И ПОСЛЕ

Черватюк А. В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

На сегодняшний день примерно около 70% эксплуатируемого парка электродвигателей составляют машины, которые были капитально отремонтированы, хотя б, один раз. К капитальному ремонту асинхронных электродвигателей предъявляются серьезные технические требования, направленные к тому, чтобы по надежности в эксплуатации и техническим характеристикам отремонтированные машины не уступали бы новым машинам, выпускаемым промышленностью.

Для обеспечения необходимого качества все ремонтируемые двигатели проходят ряд испытаний, которые могут быть разделены на три группы:

- предремонтные испытания – позволяет определить какие узлы электрической машины являются дефектными и подлежат ремонту или замене, также предремонтные испытания позволяют определить исправные двигатели, попавшие в ремонт по ошибке.
- промежуточные (операционные) испытания – необходимы, чтобы в процессе ремонта на различных его стадиях выявить допущенные при ремонте неисправности, примененные дефектные материалы, узлы, детали или запасные части и своевременно выполнить их устранить.
- сдаточные испытания – сдаточным испытаниям подвергаются все машины, отремонтированные без изменения параметров установленных заводом-изготовителем и машины, подвергшиеся каким-либо изменениям.

В объем промежуточных испытаний при ремонте входит испытание электрической прочности изоляции запасных и вновь изготовленных обмоток до укладки (проверяется как витковая, так и общая изоляция), и после укладки «пазы (до соединения и пайки) и после пайки и изолировки соединений; испытывается также электрическая прочность изоляции кронштейнов, бандажных колец, лобовых частей обмотки, стяжных и крепежных болтов (у крупных машин), контактных колец (у электродвигателей с фазовым ротором). После пайки схемы производится обычно

проверка правильности схемы. После пропитки и сушки проверяют также величину сопротивлений изоляции всей обмотки относительно корпуса и между фазами обмотки [1].

В программу контрольных испытаний асинхронных двигателей входят:

- внешний осмотр двигателя и замеры воздушных зазоров между сердечниками;
- измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между фазами обмоток;
- измерение омического сопротивления обмотки в холодном состоянии;
- определение коэффициента трансформации (в машинах с фазным ротором);
- испытание машины на холостом ходу;
- измерение токов холостого хода по фазам;
- измерение пусковых токов в короткозамкнутых двигателях и определение кратности пускового тока;
- испытание электрической прочности витковой изоляции;
- испытание электрической прочности изоляции относительно корпуса и между фазами;
- проведение опыта короткого замыкания;
- испытание на нагрев при работе двигателя под нагрузкой.

При ремонте крупных электродвигателей (мощностью 100 кВА и выше) производится на месте установки, то при контрольных испытаниях, кроме обкатки на холостом ходу, производится опробование под полной нагрузкой в течение 24 ч. [2].

В объем типовых испытаний асинхронного двигателя после ремонта входят кроме всех указанных выше контрольных испытаний, также испытания на нагревание и на кратковременную перегрузку по току.

Кроме того, при типовых испытаниях по методике, указанной в ГОСТ 7217-66, определяют величину к. п. д., коэффициента мощности, скольжения, максимального вращающего момента, а для двигателей с короткозамкнутым ротором определяют также минимальный вращающий момент в процессе пуска, начальный пусковой вращающий момент и начальный пусковой ток.

#### **Замер воздушного зазора между сердечниками.**

Увеличение зазора ведет за собой к увеличению тока холостого хода и уменьшению коэффициента мощности и полезного действия.

В собранном электродвигателе замер зазора следует производить с двух сторон (со стороны расположения схемы и со стороны, противоположной схеме) с помощью щупа, вводимого через смотровые или специальные люки в торцевых щитах. С каждой стороны замер производят в четырех точках, сдвинутых относительно друг друга по окружности на  $90^\circ$ . Величину зазора определяют как среднеарифметическую величину всех замеров.

#### **Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между фазами обмоток.**

Материалы, применяемые для изоляции обмоток электродвигателей, не являются идеальными диэлектриками и в зависимости от своих физико-химических свойств являются в большей или меньшей степени токопроводящими. Сопротивление изоляции обмоток, помимо конструкции самой изоляции и примененных материалов, в значительной степени зависит также от влажности изоляции, механических повреждений и загрязнения поверхности обмоток.

О величине сопротивления изоляции судят по величине проходящего через нее тока при приложении постоянного напряжения. Сопротивление изоляции меряют

мегомметром с ручным или электрическим приводом либо сетевым мегомметром, а также методом вольтметра.

**Испытание изоляции обмоток относительно корпуса электродвигателя и между обмотками на электрическую прочность.**

Испытания производят напряжением переменного тока промышленной частоты 50 Гц с помощью специального трансформатора, имеющего устройство для регулировки напряжения и измерительную аппаратуру. При отсутствии специального испытательного трансформатора могут быть использованы трансформаторы аппарата для испытания трансформаторного масла или от кенотронной испытательной установки.

**Испытание межвитковой изоляции обмоток на электрическую прочность.**

Для проверки состояния витковой изоляции обмотки, уложенной в пазы, существует как простые так и сложные приспособления и аппараты. К простым можно отнести поводкообразный электромагнит, к сложным - современные электронные аппараты типов ВЧФ, СМ и др. Аппараты типа СМ являются универсальными; помимо проверки уложенной обмотки на отсутствие витковых замыканий, они дают возможность производить ряд других проверок и испытаний, указанных ниже.

Обнаружение короткозамкнутых витков подковообразным электромагнитом, обмотка которого питается переменным током частотой 500-1000 Гц, производится при его передвижении по окружности статора. Если под электромагнитом, расположенным на зубцах, будет находиться короткозамкнутый виток, то в этом витке наведется э. д. с. и по нему пойдет ток, который можно обнаружить по звуку в телефоне или по дребезжанию пластины из тонкой жести, прикладываемой к зубцам статора, охваченным неисправной катушкой.

Аппараты типа СМ нашли широкое применение при эксплуатации и ремонте электродвигателей. Принцип действия аппарата следующий.

К аппарату подсоединяются две обмотки, в которые поочередно посылаются импульсы напряжения высокой частоты. Если полное сопротивление обмоток одинаково, то одинаковым будут и импульсы тока. Это находит свое отображение на экране электроннолучевой трубки: соответствующие кривые, относящиеся к двум сравниваемым обмоткам, будут сливаться. Если же в одной из обмоток будет какой-либо дефект, отражающийся на величине ее сопротивления, например витковые замыкания, неправильное число витков, неправильное соединение «параллельных ветвей и др., то импульсы токов, проходящих через эти обмотки, будут различны. На экране трубки будет уже не одна, а две кривые.

При всех испытаниях для измерения электрических величин должны применяться измерительные приборы необходимого класса точности; в частности, применяемые электроизмерительные приборы (с шунтами и добавочными сопротивлениями), мосты, измерительные трансформаторы тока и напряжения должны быть класса точности не ниже 0,5. Исключение допускается для измерений сопротивления изоляции, когда применяются обычные мегомметры, а также для измерения мощности в трехфазной сети одним трехфазным ваттметром (допускается применять трехфазный ваттметр класса не ниже 1).

Для обеспечения необходимой точности измерений измерительные приборы следует подбирать так, чтобы измеряемые значения электрических величин находились в пределах 20 — 95% шкалы. Особенно важно правильно выбрать однофазные ваттметры для измерения мощности в трехфазных цепях по методу двух ваттметров; необходимо,

чтобы одновременно измеряемые токи и напряжения были не меньше 20% номинальных токов и напряжений, показываемых ваттметром. Если при испытаниях производятся измерения по нескольким приборам, необходимо отсчеты показаний всех приборов производить одновременно.

Заключение: Изложенные методы испытаний асинхронных электродвигателей были применены автором статьи на предприятии ООО «Сибмотор». Автор убедился на собственном опыте в необходимости вышеизложенных испытаний, чтобы оценить качество произведенного ремонта.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Слоним Н.М. Испытания асинхронных двигателей при ремонте, М., «Энергия», 1970. 80 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 304).
2. Партала О.Н. Справочник по ремонту электрооборудования. Книга +CD. – Спб.: Наука и Техника, 2010. – 416 с.: ил.

### **АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСОВ**

Коробков А.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В настоящее время широкое применение на городском транспорте находит троллейбус, имеющий ряд преимуществ по сравнению с автобусом и трамваем. На троллейбусных маршрутах страны ежегодно регистрируются более 400 тыс. отказов машин, из которых доля отказов электрооборудования составляет 35 – 70 % от общего числа отказов. Поэтому анализ причин отказа электрооборудования весьма актуален, т.к. он позволяет достоверно выявить причину отказа, что позволит принять меры и избежать её в дальнейшем.

Цель работы – исследование причин и видов отказа электрооборудования троллейбусов и их классификация.

Для достижения заданной надежности в эксплуатации особую роль занимают экспериментальные оценки, позволяющие оценить фактические показатели надежности. Количественные показатели надежности экспериментально можно определить по результатам лабораторных испытаний или эксплуатационных испытаний и наблюдений. Последние на сегодняшний день являются основным источником информации об отказах изделий [1]. Эти испытания позволяют решить ряд важных задач:

- выявление причин отказов и повреждений, а также определение деталей, сборочных единиц и комплектующих изделий, обеспечивающих надежность, что позволяет разработать конкретные рекомендации по ее повышению;
- обнаружение неудачных конструктивных решений, несовершенства методов эксплуатации и технологии изготовления, что в дальнейшем позволяет разрабатывать рекомендации по повышению надежности на стадиях конструирования, изготовления и эксплуатации;
- определение влияния условий эксплуатации и работы на надежность, которые позволяют разработать меры по снижению вредного воздействия эксплуатационных факторов и математическую модель прогнозирования и управления надежностью;

– нормирование показателей надежности, а так же определение экономической составляющей от их повышения.

Как объект исследования с позиции надежности электрооборудование троллейбусов обладают рядом особенностей, которые отражаются на проведении эксплуатационных испытаний. К ним относятся:

- многофункциональность, разнообразие выполняемых изделиями функций, среди которых выделяют технологические, защитные и вспомогательные функции;
- разнообразие используемых элементов, как электротехнических, так и механических, имеющих различные виды отказов и широкий спектр математических распределений случайных величин, характеризующих их надёжностные свойства;
- широкий диапазон условий эксплуатации, включающий и исключительно тяжелые (повышенная влажность и запыленность, повышенная температура, механические воздействия, сильные морозы);
- связь надежности и безопасности функционирования, так как отказы средств защиты могут привести к пожару или поражению пассажиров электрическим током.

Одним из важнейших этапов для анализа причин отказов является классификация отказов. Она проводится и используется при анализе, оценке и контроле надежности, так же при нормировании показателей, определении влияния на надежность факторов конструкции, изготовления и эксплуатации.

Помимо этого используются дополнительные признаки:

- момент проявления отказа (наработка или календарное время);
- изменение параметра, определяющего работоспособность, во времени (внезапное, постепенное);
- способы восстановления работоспособного состояния (замена детали, ремонт детали, замена сборочной единицы, замена изделия для ремонта в мастерской, регулировка, замена изделия для отправки в КР или для списания).

Основные признаки классификации отказов:

- Организационная причина отказа (Конструкционная, Производственно-технологическая, Эксплуатационная, Естественный износ и старение, Неизвестная);
- Механизм возникновения отказа (Электрический, Тепловой, Химический, Механический, Вибрационный, Комбинированный);
- Степень нарушения работоспособности (Полный отказ, Частичный отказ);
- Последствия отказа: Опасные (Пожар, Поражение током, Травмирование, Экологическая авария) и Неопасные (Экономический ущерб, Без последствий);
- Возможность и способ обнаружения: Профилактируемые (Инструментально, Органолептически) и Непрофилактируемые;
- Период возникновения (Во время срока гарантии, После срока гарантии);
- Срочность устранения (Аварийное, В ремонтную смену, При плановом ТО);
- Способ устранения (На месте установки, В мастерской, При капитальном ремонте (КР), Неустраняемые);
- Восстанавливаемость работоспособного состояния (Полная, Частичная).

Дефектация непосредственно на месте эксплуатации является источником сведений об отказах. Анализ отказов по причине поломки обмотки ротора зачастую выявляет, что неисправности в щеточно-коллекторном узле и обмотке связаны с попаданием влаги, пыли, смазки подшипников. Последнее, из перечисленных факторов, возможно по нескольким причинам:

- использование обслуживающим персоналом, при пополнении подшипников, низкокачественных марок смазок с низкой температурой каплепадения, а так же

- химически несовместимые с заводской смазкой, что вызывает разложение смеси смазок и вытекание её впоследствии;
- излишки смазки, которые под давлением выжимает внутрь станины;
  - в результате износа лабиринтных уплотнений увеличиваются зазоры, через которые возможно выбрасывание смазки.



Рис. 1. Виды и причины отказов всех сборочных единиц

Большая часть отказов приходится на обмотку статора насыпных обмоток и с жесткими катушками. Вторичные отказы обмоток происходят из-за проникновения внутрь влаги, так же из-за отсутствия защиты от перегрева в режиме КЗ при заклинивании рабочих машин. Для обмоток статора с жесткими катушками более уязвимыми являются лобовые части со стороны, противоположной схеме соединения, пазовая часть, оба выхода из паза и головки катушек в схеме соединения. Анализ подшипников показывает, что при загрязнении смазки вначале появляются потемнение подшипников от перегрева, коррозия, усталостные повреждения и разрушения отдельных подшипников, после появляется абразивный износ и очень сильно возрастают все виды дефектов, коррозия, и, в конце концов, выход из строя подшипников.

Сведения, полученные при дефектации непосредственно на месте эксплуатации, являются наиболее достоверными, т.к. в дефектацию не попадают повреждения, полученные при транспортировании, при хранении в ремонтном фонде и т.д. Зачастую причинами отказов являются ошибки персонала при эксплуатации, а так же приборов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Захарченко П. И., Ширнин И.Г., Ванев Б. Н., Гостищев В. М. Обеспечение надежности асинхронных двигателей// УкрНИИВЭ,-Донецк, 1998. - 324 с.
2. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов - М.: Издательский дом МЭИ, 2006. -432с.
3. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: учебник / Н.Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов. Под ред. Н. Ф. Котеленца.М.: Академия, 2003. — 384 с.

## КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Абрамовская А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Погрешность измерения некоторых типов индукционных датчиков положения углового перемещения может быть значительно снижена за счет почти полного исключения эксплуатационной составляющей: от колебания напряжения питания, частоты, температуры, давления и т.п. [1]. Это стало возможным при инвариантной схеме построения, когда выходной характеристикой является отношение разности выходных полуобмоток  $U_{21}$  и  $U_{22}$  к опорному сигналу, за который может быть принята их сумма ( $U_{21}+U_{22}$ ) :

$$Y = \frac{U_{21} - U_{22}}{U_{21} + U_{22}} \quad (1)$$

или к опорному сигналу  $U_0$  со специальной опорной обмотки:

$$Y = \frac{U_{21} - U_{22}}{U_0} \quad (2)$$

В случае реализации этой схемы погрешность измерения будет определяться только нелинейностью выходной характеристики. В свою очередь, нелинейность выходной характеристики может быть существенно уменьшена с помощью схем электронной коррекции. В этом случае такие датчики могут заменить более сложные редуктосины, применяемые, например, в гироскопах.

В результате проведенных испытаний были получены параметры и характеристики датчика, представленные в таблице 1.

По полученным значениям были построены зависимости нелинейности от перемещения штока, представленные на рисунке 1.

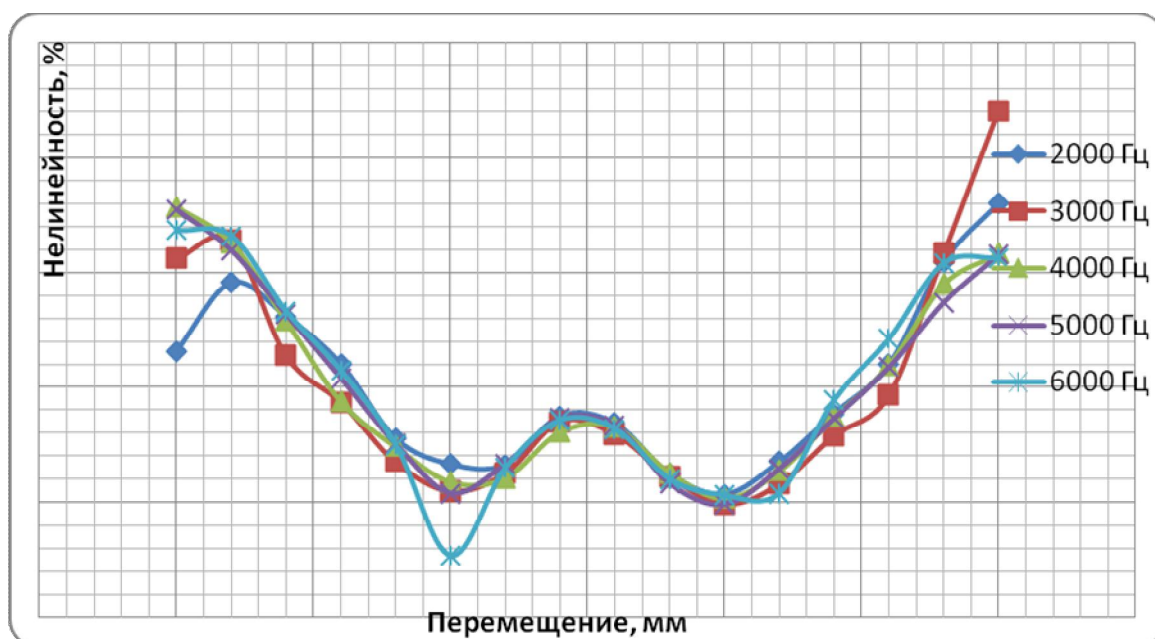
Как видно из зависимостей, изменение частоты питания практически не оказывает влияние на работу датчика и на его выходные характеристики.

Таким образом, анализируя полученную зависимость, можно сделать вывод, что инвариантная схема уменьшает эксплуатационные погрешности (погрешности от колебания частоты питания). В датчиках с инвариантной схемой получение нелинейности менее 0,8 % за счет изменения плотности распределения витков во вторичной обмотке по длине каркаса без изменения длины сердечника труднодостижимо. Основная задача при создании таких датчиков – это поиск варианта изменения потокосцеплений первичной и двух вторичных обмоток в зависимости от хода, обычно являющихся нелинейными функциями, такими, чтобы алгоритм разности напряжений этих обмоток отнесенной к их сумме давал бы линейную функцию.



**Таблица 1. Результаты эксперимента**

Перемещение, мм	Нелинейность, % при 2000 Гц	Нелинейность, % при 3000 Гц	Нелинейность, % при 4000 Гц	Нелинейность, % при 5000 Гц	Нелинейность, % при 6000 Гц
-15	0,294	0,562	0,789	0,777	0,683
-13	0,564	0,640	0,632	0,599	0,660
-11	0,441	0,137	0,290	0,318	0,331
-9	0,173	-0,065	-0,061	0,040	0,071
-7	-0,132	-0,326	-0,259	-0,248	-0,253
-5	-0,296	-0,450	-0,411	-0,460	-0,733
-3	-0,284	-0,374	-0,394	-0,335	-0,354
-1	-0,122	-0,149	-0,194	-0,136	-0,146
1	-0,113	-0,204	-0,172	-0,168	-0,182
3	-0,309	-0,389	-0,372	-0,420	-0,403
5	-0,371	-0,506	-0,482	-0,509	-0,471
7	-0,277	-0,420	-0,364	-0,356	-0,461
9	-0,029	-0,210	-0,130	-0,136	-0,057
11	0,195	-0,035	0,096	0,087	0,210
13	0,272	0,585	0,451	0,370	0,541
15	-0,005	1,205	0,583	0,578	0,563



**Рис. 1.** Зависимость нелинейности от перемещения штока по инвариантной схеме

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко М.Г., Марьянов Г.М., Филиппов В.И., Колокольцов В.Н., Исаев А.А. / Компенсация погрешностей индукционных бесконтактных датчиков положения // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов. конф. НПЦ «Полус». Томск, 2001.
2. Шидлович Л.Х. / Дифференциальные трансформаторы и их применение // – М.: Энергия, 1966.
3. Савченко М.Г., Марьянов Г.М., Филиппов В.И. / Двухканальные датчики типа ЛДТ на одном магнитопроводе. // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов. Новосибирск: наука, 2007.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ ОТДЕЛЬНОГО НАСЕЛЁННОГО ПУНКТА НА ОСНОВАНИИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Мошнориз Н.Н., Довганич А.Н.

Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

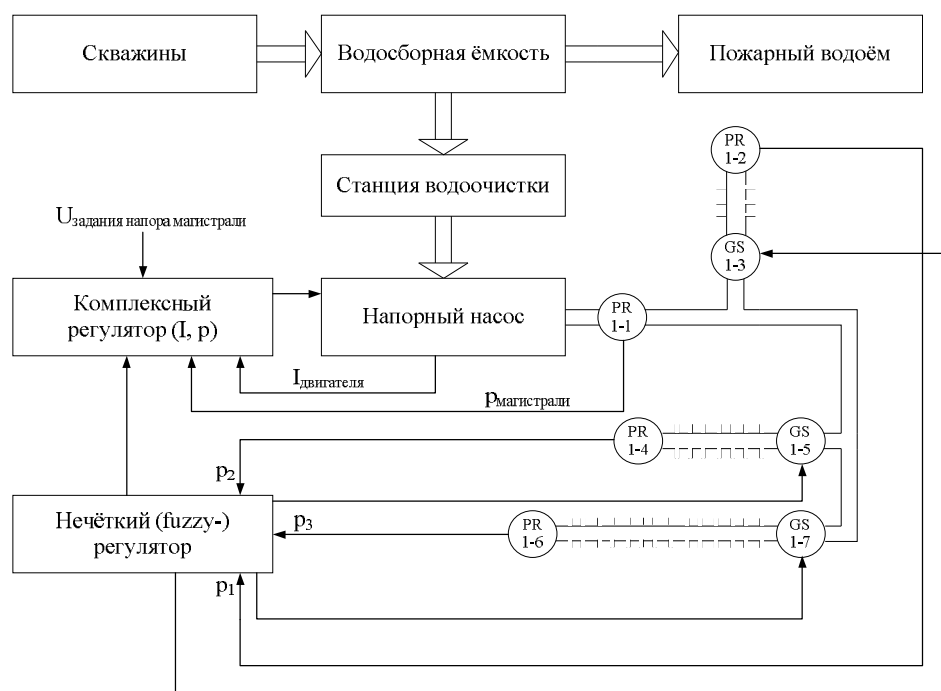
Существует большое количество населённых пунктов, удовлетворение потребности населения которых в воде не может быть обеспечено от близлежащих водоёмов или от сетей водоснабжения соседних населённых пунктов (в силу особенностей их местонахождения или других причин), либо оно нецелесообразно. Тогда водоснабжение посёлка осуществляется из скважин, обычно располагающихся по периметру населённого пункта.

В таких случаях снабжение водой происходит по следующей схеме. Сначала вода, добытая из скважин, собирается в некоторой водосборной ёмкости. После чего вода из этой ёмкости уходит либо на наполнение пожарного водоёма, либо через станцию очистки – в водопроводную магистраль, из которой вода под напором поступает к потребителям.

При работе таких систем водоснабжения часто могут возникать ситуации, когда вследствие интенсивного водоотбора в одной части посёлка вода до других его частей доходит с пониженным напором. С целью улучшения качества водоснабжения всего населённого пункта в целом может быть целесообразным усовершенствование системы водоснабжения посёлка посредством установки заслонок перед каждой основной веткой водопроводной магистрали, управляемых от нечёткого (fuzzy-) регулятора.

Допустим, магистраль водоснабжения некоего отдельного населённого пункта имеет три ответвления. Тогда общая схема усовершенствованной таким образом станции водоснабжения посёлка может быть проиллюстрирована на рис.1.

В схеме на рис.1 приняты следующие условные обозначения: PR 1-1, 1-2, 1-4, 1-6 – датчики давления на входе магистрали и на выходах её первой ( $p1$ ), второй ( $p2$ ) и третьей ( $p3$ ) веток соответственно; GS 1-3, 1-5, 1-7 – управляемые сервоприводами заслонки первой, второй и третьей веток магистрали соответственно.



**Рис. 1.** Общая схема системы водоснабжения отдельного населённого пункта на основании применения нечёткого регулятора

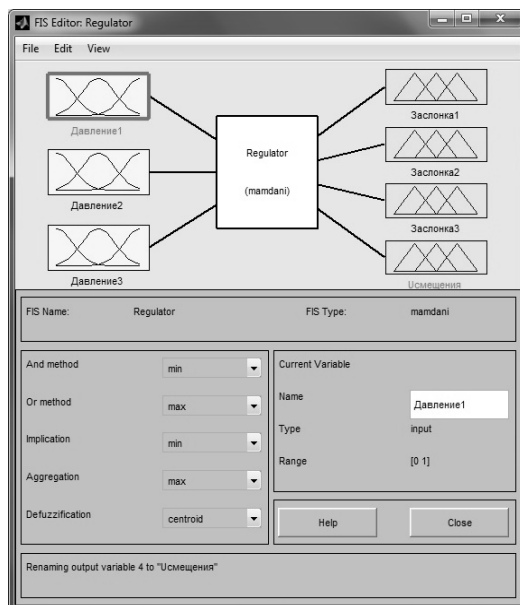
Работа системы управления водоснабжением, указанной на рис.1, происходит таким образом. Напор в водной магистрали создаётся с помощью напорного насоса, который с помощью комплексного регулятора охвачен обратными связями по току приводного двигателя и по давлению магистрали. Сигналы с датчиков давления на концах каждой из веток водопроводной магистрали подаются на нечёткий регулятор. На выходе нечёткого регулятора имеем четыре сигнала: три сигнала управления положением заслонок каждой из веток магистрали, а также сигнал коррекции общей накачки воды в магистраль, который подаётся на второй вход комплексного регулятора. На первый вход комплексного регулятора подаётся сигнал задания напора воды в магистраль.

Расчёт нечёткого регулятора и построение его характеристик для такой системы водоснабжения проведём в программной среде Fuzzy Toolbox пакета прикладных программ MatLAB.

Для обеспечения максимального качества выходных характеристик регулятора и упрощения его дальнейшей настройки принимаем такие исходные параметры регулятора:

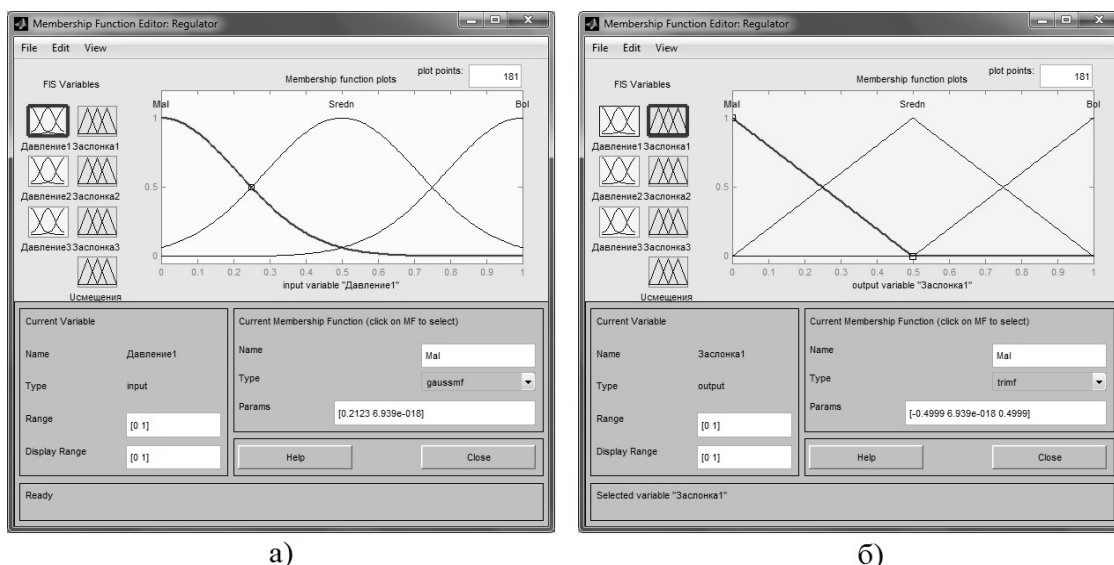
- количество лингвистических переменных каждого из сигналов входа/выхода – 3,
- форма функций принадлежности терм входных сигналов – гауссовская (колоколообразная),
- форма функций принадлежности терм сигналов выхода – треугольная,
- значения давлений, положений заслонок и сигнала коррекции общей накачки воды в магистраль – в относительных единицах (для давлений: 0 – минимум, 1 – максимум; для заслонок: 0 – заслонка полностью закрыта, 1 – заслонка полностью открыта).

Сначала зададим в Fuzzy Toolbox количество входных и выходных сигналов нечёткого регулятора (рис.2).



**Рис. 2.** Задание количества входных и выходных сигналов нечёткого регулятора в программной среде Fuzzy Toolbox

Затем приступаем к определению количества терм (лингвистических переменных) каждого сигнала нечёткого регулятора, а также к определению их функций принадлежности (рис. 3).



**Рис. 3.** Примеры определения количества терм и их функций принадлежности: а) для сигналов по давлению в первой ветке магистрали, б) для значений положений заслонки перед первой веткой водопроводной магистрали ( $\alpha 1$ )

После определения количества терм и их функций принадлежности определяем систему правил нечёткой логики, по которым в дальнейшем будет работать разрабатываемый регулятор (рис.4).

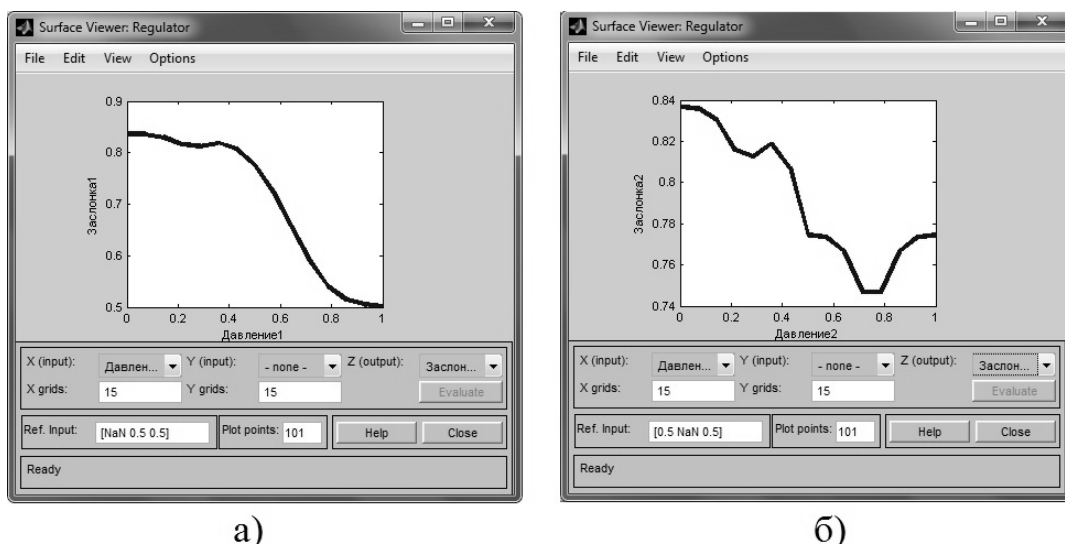
1. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
2. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
3. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Bol) (1)
4. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
5. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
6. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Bol) (1)
7. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
8. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
9. If (Давление1 is Mal) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Bol) (1)
10. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
11. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
12. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Bol) (1)
13. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
14. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Sredn) (1)
15. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Sredn) (1)
16. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
17. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Sredn) (1)
18. If (Давление1 is Sredn) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Bol)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Sredn) (1)
19. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
20. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
21. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Mal) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Bol) (1)
22. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
23. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Sredn) (1)
24. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Sredn) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Bol)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Sredn) (1)
25. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Mal) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Bol) (1)
26. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Sredn) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Bol)(Усмещения is Sredn) (1)
27. If (Давление1 is Bol) and (Давление2 is Bol) and (Давление3 is Bol) then (Заслонка1 is Sredn)(Заслонка2 is Sredn)(Заслонка3 is Sredn)(Усмещения is Mal) (1)

**Рис. 4.** Система правил нечёткой логики разрабатываемого регулятора

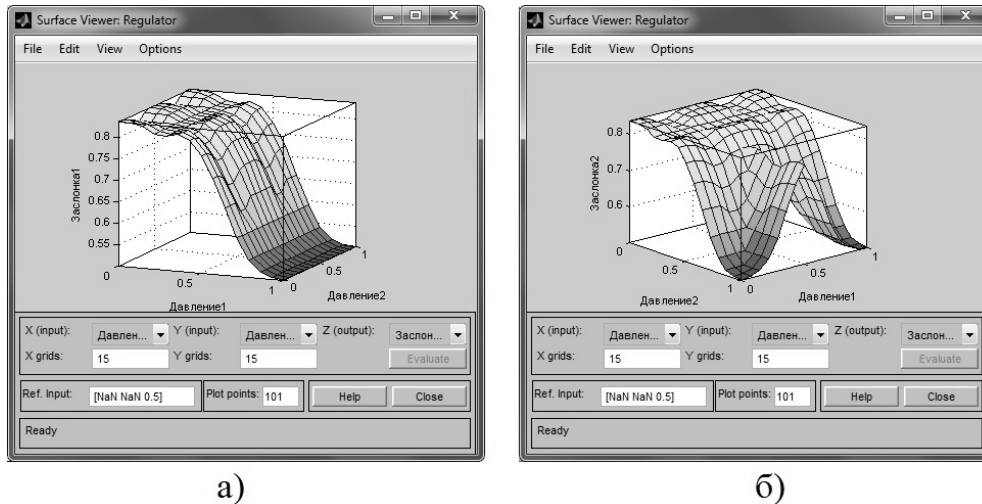
В результате расчёта нечёткого регулятора в программной среде Fuzzy Toolbox получаем ряд его характеристик: 2-мерные зависимости положений заслонок от давлений воды в соответствующих ветках магистрали, 3-мерные зависимости положений заслонок от давлений воды в соответствующей и одной из соседних веток магистрали, а также 3-мерные зависимости значения сигнала коррекции общей накачки воды в магистраль от двух произвольных давлений воды в ветках магистрали.

При анализе характеристик нечёткого регулятора было обнаружено полное совпадение 2-мерных зависимостей  $\alpha_1 = f(p_1)$  и  $\alpha_3 = f(p_3)$  (рис.5, а).

Для 3-мерных характеристик были обнаружены полные совпадения между такими зависимостями: между  $\alpha_1 = f(p_1, p_2)$ ,  $\alpha_1 = f(p_1, p_3)$ ,  $\alpha_3 = f(p_1, p_3)$  и  $\alpha_3 = f(p_2, p_3)$  (рис.6, а); между  $\alpha_2 = f(p_2, p_1)$  и  $\alpha_2 = f(p_2, p_3)$  (рис.6, б); между  $U_{\text{смещения}} = f(p_1, p_2)$ ,  $U_{\text{смещения}} = f(p_2, p_3)$  и  $U_{\text{смещения}} = f(p_1, p_3)$  (рис.7).



**Рис. 5.** 2-мерные зависимости  $\alpha_1 = f(p_1)$  и  $\alpha_3 = f(p_3)$  (а) и  $\alpha_2 = f(p_2)$  (б)



а)  $\alpha_1 = f(p_1, p_2)$ ,  $\alpha_1 = f(p_1, p_3)$ ,  $\alpha_3 = f(p_1, p_3)$ ,  $\alpha_3 = f(p_2, p_3)$  (а),  
 б)  $\alpha_2 = f(p_2, p_1)$ ,  $\alpha_2 = f(p_2, p_3)$  (б)

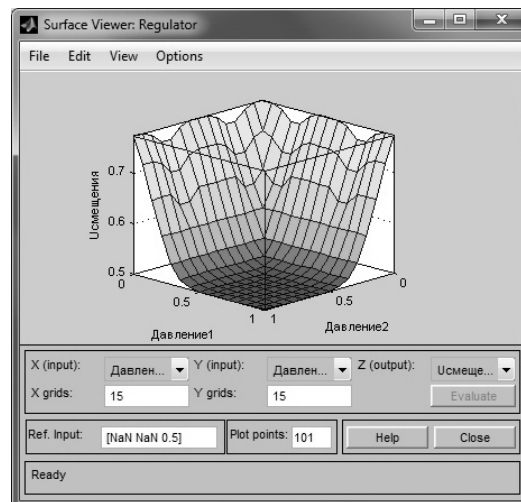


Рис. 7. 3-мерные зависимости  $U_{\text{смещения}} = f(p_1, p_2)$ ,  $U_{\text{смещения}} = f(p_2, p_3)$  и  $U_{\text{смещения}} = f(p_1, p_3)$

При визуальной оценке полученных поверхностей характеристик взаимных зависимостей на рисунках 5 – 7 видно, что ни на одной из них не наблюдается мест несистемных локальных минимумов («ям»), либо локальных максимумов («бугров»). Таким образом, разработанный нечёткий регулятор вполне пригоден для отработки своих функций при его возможном воплощении в виде реальной модели.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в MATLAB и fuzzy TECH. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
2. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

## ВРАЩЕНИЕ РОТОРА МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПИТАНИИ

Самодуров И.Н., Ляпунова М.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

На кафедре точного приборостроения Томского политехнического университета активно идет исследование макета моментного двигателя с ленточной намоткой. Одной из главных задач в настоящее время является поиск возможных путей практической реализации данной идеи.

Учитывая конструктивные особенности данного двигателя, считаем, что наиболее эффективно использование его в режиме импульсного включения, т.е. подача питания будет осуществляться кратковременно. Пуск двигателя происходит не из положения равновесия, а с небольшим отклонением, позволяющим нам преодолеть момент сопротивления сухого трения в опорах подшипников.

Отключение питания должно происходить до того момента, когда ротор двигателя достигнет полюсного деления. После отключения питания двигатель будет работать в режиме выбега.

На рисунке 1 представлена моментная характеристика двигателя при силе тока, равной 1 А, полученная экспериментальным путем[3].

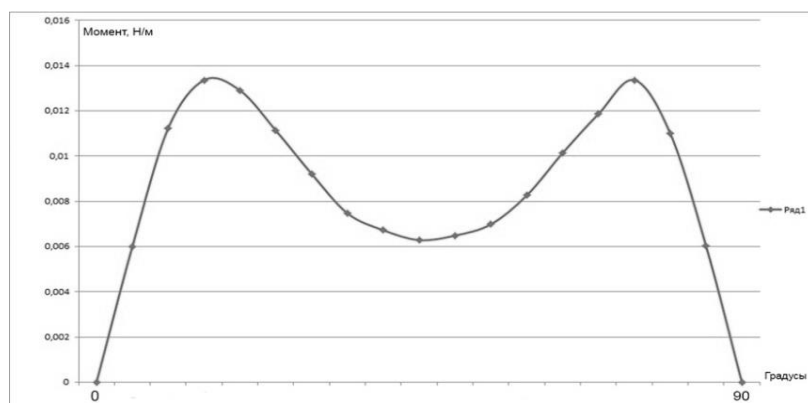


Рис. 1. Моментная характеристика двигателя

Полученная характеристика представляет определенные трудности для аналитического исследования, поэтому аппроксимируем в виде ряда отрезков прямой, как показано на рисунке 2.

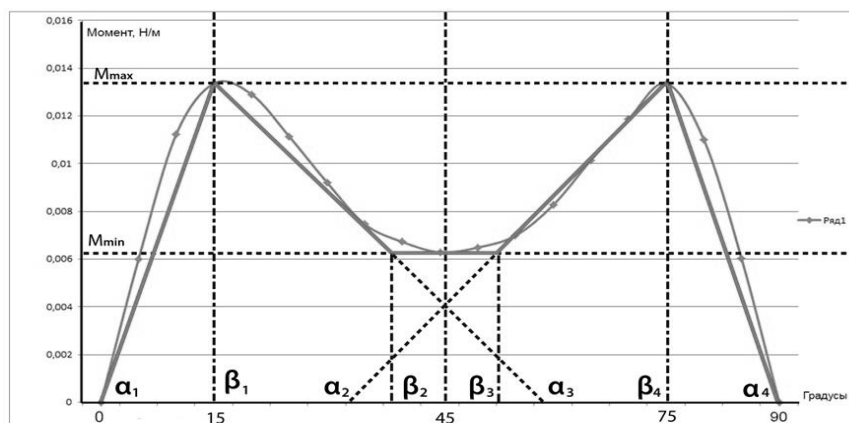


Рис. 2. Аппроксимация моментной характеристики двигателя

Характерные точки аппроксимированной кривой приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Значения углов на графике аппроксимации.

Название	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
Угол, °	0	35	60	90	15	40	50	75

В зависимости от необходимого режима вращения ротора, можно осуществлять подачу питания на двигатель в течение различных углов поворота ротора, используя соответствующий датчик угла. В данной статье нами будет рассмотрен вариант подачи питания во время прохождения первого и второго участков. Основными задачами являются: нахождение времени подачи импульса и развиваемой угловой скорости. Для этого нам необходимо, на основании силовой характеристики, составить и решить дифференциальные уравнения для первого и второго участков, используя следующие данные, полученные экспериментальным путем[3]:

$$M_{\max} = 13.2 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\min} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad J = 3.37 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Уравнение движения для первого участка[2]:

$$\alpha_1 = 0$$

$$\frac{J\ddot{\alpha}}{\beta_1} = M_{\max} - \alpha \quad \alpha(0) = 5^\circ$$

Используя операторный метод решения дифференциальных уравнений, находим зависимость изменения угла с течением времени:

$$Jp^2 X(p) - 5Jp - CX(p) = 0; \quad C = \frac{M_{\max}}{\beta_1}$$

$$X(p) = 5 \left[ \frac{p}{p^2 - \frac{C}{J}} \right] = 5 \cdot \text{ch} \sqrt{\frac{C}{J}} t$$

Из полученной выше зависимости выводим время прохождения данного участка графика:

$$t = \frac{\text{ch}^{-1} \frac{\beta_1}{\alpha_0}}{\sqrt{\frac{C}{J}}} = \frac{\text{ch}^{-1} \frac{15}{5}}{\sqrt{\frac{13.2 \cdot 10^{-3}}{3.37 \cdot 10^{-3} * 0.262}}} = 0.458 \quad \text{с.}$$

Зная то, что скорость это первая производная от координаты по времени находим конечную угловую скорость на данном участке:

$$\omega = \frac{d}{dt} \left( 5 \cdot \text{ch} \sqrt{\frac{C}{J}} \cdot t \right) = \frac{d}{dt} \left( 5 * \text{ch} \sqrt{\frac{13.2 \cdot 10^{-3}}{3.37 \cdot 10^{-3} * 0.262}} * 0.458 \right) = 55.154 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Аналогично решаем уравнение для второго участка. Так же учитываем, что конечная скорость на предыдущем участке является начальной для данного участка.

$$\frac{J\ddot{\alpha} + M_{\max}}{\alpha_3 - \beta_1} \cdot \alpha = M_{\max}; \quad \frac{M_{\max}}{\alpha_3 - \beta_1} = F$$

$$X(p)(Jp^2 + C) = M_{\max} - 15p - 55.154$$

$$X(p) = 15 \cdot \text{ch} \sqrt{\frac{F}{J}} t + \frac{M_{\max} + 55.154}{\sqrt{\frac{F}{J}}} \cdot \text{sh} \sqrt{\frac{F}{J}} t$$



$$t = \frac{\beta_2}{\beta_1 \cdot ch \sqrt{\frac{F}{J}} + 55.167 \cdot sh \sqrt{\frac{F}{J}}} = \frac{0.697}{0.262 * ch(0.007) + 55.167 * sh(0.007)} = 0.455 \text{ с.}$$
$$15 * ch(0.007) * 0.455 + 55.167 * sh(0.007) * 0.455 = 87.979 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Конечная угловая скорость равна  $87.979 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Время подачи импульса 0.913 с. Решение задач подобного рода позволяет определить конечную скорость и время прохождения каждого участка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартемьянов В.М., Иванова А.Г., Кодермятов Р.Э. Исполнительные двигатели с ленточной намоткой // Вестник Науки Сибири 2013. Номер 1 (7)
2. Самодуров И.Н., Кодермятов Р.Э., Иванова А.Г. Аналитическое исследование движения ротора моментного двигателя при импульсном питании // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной юбилейной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3т. – Томск, 2014. – Т.1. – С. 269-270.
3. Самодуров И.Н., Кодермятов Р.Э. Экспериментальное определение характеристик двигателя с ленточной намоткой статора. // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной юбилейной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 3т. – Томск, 2014. – Т.1. – С. 239-240.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕССОВАНИЯ ОКСИДНОЙ НАНОКЕРАМИКИ

Дуданец А.А., Ивашутенко А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

К настоящему времени разработано большое количество составов и технологий получения корундовой керамики, но основным её недостатком остается высокая температура обжига изделий (1700–1800°C). Для снижения роста кристаллитов в керамике важна минимизация воздействия высоких температур при ее спекании. Экспериментальные данные подтверждают, что повышение температуры спекания керамики приводит к большему размеру зерна и к ухудшению механических свойств. В частности, при спекании  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  со средним размером зерна 0,22 мкм наилучшие показатели имела керамика, спеченная при температуре 1300°C. Одним из необходимых условий для снижения температуры спекания является стартовая плотность прессовки. Повышение плотности укладки частиц увеличивает количество межчастичных контактов, и спекание при этом будет протекать и интенсивней, и равномерней. Кроме этого, высокая плотность укладки подразумевает не только малую пористость, но и малый размер пор и их равномерное распределение, что в конечном итоге ведет к ускоренному достижению полной плотности керамики. Проблемы прессуемости и рекристаллизации наноразмерных порошков значительно сузили возможности традиционных методов прессования и спекания в получении наноструктурных материалов и побудили к поиску новых подходов.

Применение высокоинтенсивных методов прессования в комплексе с использованием слабо агрегированных порошков повышает однородность укладки и

разрушает агрегаты частиц. В частности, магнитно-импульсный метод прессования нанопорошков позволяет эффективно преодолевать силы адгезионного сцепления и достигать более высоких плотностей прессовок. Импульсные методы прессования выгодно сочетают возможности генерирования новых состояний вещества и получения высокоплотных прессовок.

Также перспективным направлением в получении керамики является технология искрового плазменного спекания. Технология основана на модифицированном методе горячего прессования, в котором электрический ток подается не на внешний нагреватель, а напрямую пропускается через пресс-форму и заготовку. Благодаря пропусканию импульсного электротока и возникающему при этом «эффекту плазмы разряда» (“spark plasma effect”), удается реализовать исключительно быстрый предварительный нагрев и кратковременные циклы. В результате можно подавить рост зерна и возникновение равновесных состояний, что позволяет получить материалы с ранее недостижимой композицией и свойствами, а также материалы в субмикронном или наномасштабном диапазоне, или композиты с уникальным или необычным составом.

Целью статьи является исследование влияния предварительного двустороннего магнитно-импульсного (ДМИ) компактирования на свойства керамики, полученной с использованием искрового плазменного спекания.

Для оценки влияния предварительного ДМИ-прессования были проведены эксперименты по получению корундовой керамики с применением технологии искрового плазменного спекания с предварительным ДМИ-прессованием и без него. Технологические режимы получения керамики на основе  $Al_2O_3$  приведены в таблицах 1,2.

**Таблица 1.** Режим ДМИ-прессования

Режим	Масса засыпки, г	Температура прессования, °С	Давление прессования, МПа	Ёмкость накопителя, мФ	Напряжение, кВ
ДМИ-прессование	3,5	20	300	14,4	1

**Таблица 2.** Режим искрового плазменного (ИП) спекания

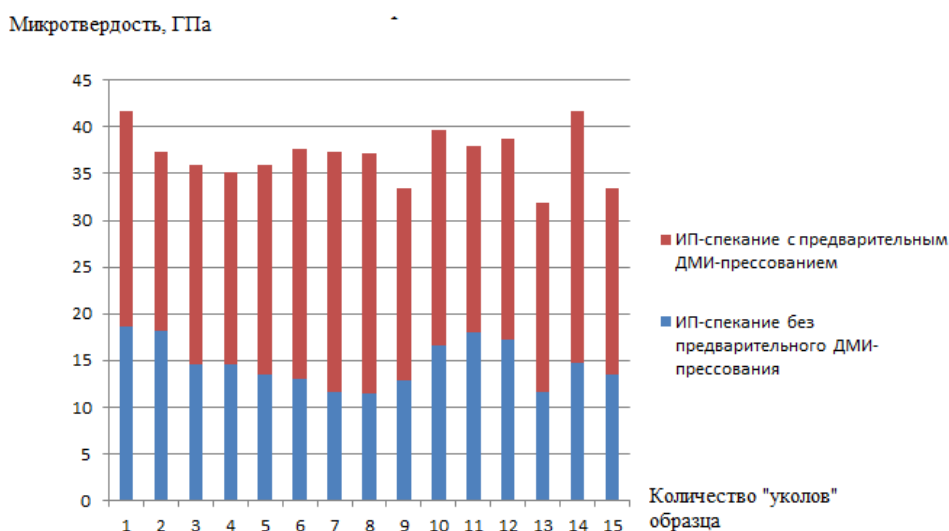
Режим	Температура спекания, °С	Давление прессования, МПа	Скорость роста температуры, °С/мин	Атмосфера	Выдержка, сек.
ИП-спекание	1400	50	100	вакуум	10

После проведения опытов была измерена плотность и микротвердость полученной керамики. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Микротвердость является одним из важнейших физико-механических свойств керамики, по которому определяют качество данного материала. Для сравнения керамики, полученной при разных технологических режимах, была построена гистограмма микротвердости (рис. 1).

**Таблица 3.** Значения плотности и микротвердости керамики, полученной при различных технологических режимах

Режим ИП - спекания	Микротвердость, ГПа	Реальная плотность керамики, г/см <sup>3</sup>	Относительная плотность керамики, (%)
С предварительным ДМИ-прессованием	22,33	3,76	95,3
Без предварительного ДМИ-прессования	14,68	3,47	87,95



**Рис. 1.** Гистограмма микротвердости керамики, полученной при разных технологических режимах

Как видно из таблицы 3, среднее значение микротвердости для керамики полученной с предварительным ДМИ-прессованием составляет 22,33ГПа, что на 60% больше чем у керамики полученной по технологии ИП-спекания без предварительного ДМИ-прессования (14,68ГПа). Кроме того немаловажным показателем эффективности технологии получения керамики является плотность. Значение плотности керамики, полученной с предварительным ДМИ-прессованием составляет 3,758 г/см<sup>3</sup> (95% от теор. значения (3,95 г/см<sup>3</sup> - теория)), что на 7% больше, чем у керамики, полученной без предварительного ДМИ-прессования (3,47 г/см<sup>3</sup> (87,95% от теор. значения)).

Результаты экспериментов по получению корундовой нанокерамики позволяют говорить об эффективности совмещения двух технологий: двухстороннего магнитно-импульсного прессования и искрового плазменного спекания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ноздрин А. А., Исследование динамической прессуемости наноразмерных порошков на основе оксида алюминия. Перспективные материалы Материалы, 2007, №6.
2. Болтачев Г.Ш., Волков Н.Б., Кайгородо А.С. Лознухо В.П., Особенности одноосного квазистатического компактирования оксидных порошков. Российские нанотехнологии, Том 6, 2011. №9.
3. V. Ivanov, Y.A. Kotov, O.H. Samatov, Synthesis and dynamic compaction of ceramic nanopowders by techniques based on electric pulsed power. Nano structured Materials, 1995, Vol. 6, pp. 287-290.

## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кортенко А.В., Усачева Т.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Проблема энергосбережения на сегодняшний день актуальна не только в России, но и в мире в целом. Данная проблема все больше обостряется в связи с увеличением стоимости энергоносителей. Из-за этого конкурентоспособность российской продукции в большей степени зависит именно от экономного расходования электроэнергии. На данный момент проектирование энергоэффективных электрических машин в России является первоочередной задачей энергосбережения страны в целом [1].

Энергосберегающие двигатели – это трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Кроме энергосбережения эти двигатели имеют: увеличенный срок службы обмотки за счет меньшей температурной нагрузки, позволяют выдерживать большие перегрузки в номинальном режиме.

Цель работы: на основе математической модели с сохраненной поперечной геометрии машины провести анализ изменения надежности при проектировании энергосберегающих асинхронных двигателей.

Этот путь моделирования энергосберегающих АД наиболее экономически целесообразен. Он не требует инвестиций на переоборудование производства. Данный способ проектирования вызывает дополнительный расход активных материалов при изготовлении АД, и при этом увеличивается стоимость машины, но возрастание стоимости АД компенсируется за счет меньших затрат на период эксплуатации, так же данные двигатели обладают повышенной надежностью.

Для анализа изменения надежности были произведены расчёты на основе математической модели (ММ) проектировании энергосберегающих асинхронных двигателей. Исходными параметрами модели являются - поперечная геометрия базовых машин: внешний и внутренний диаметры статора и пазовые зоны. Ограничивающим факторам расчета стали среднее превышение температуры обмотки статора и показатели качества:  $M_m^*$  – (2.59, о.е.) – кратность максимального вращающего момента,  $I_p^*$  – (6.2, о.е.) – кратность пускового тока,  $M_p^*$  – (1.43, о.е.) – кратность пускового вращающего момента. В скобках приведены допустимые значения показателей качества, которые удовлетворяют требованию ГОСТа [2].

В качестве выходных параметров математической модели приняты: КПД –  $\eta$ , коэффициент мощности –  $\cos\varphi$ , единичный показатель надежности. В качестве единичного показателя надежности принято увеличение срока службы изоляции  $T_{сл}/T_0$ . Математическая модель реализована в программной среде MathCAD.

Надёжность – один из основных показателей качества технического устройства на любом отрезке его «жизни» – от этапа проектирования до эксплуатации. Поэтому спроектированные энергоэффективные АД, наряду с энергетическими параметрами должны обладать повышенной надежностью и иметь более низкие показателями по уровню шума и вибрации.

Надёжность электрической машины – свойство машины выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования [3]. Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения машины и условий её эксплуатации может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Срок службы – это показатель долговечности, а

его прогнозирование сводится к расчёту надёжности электрической машины (аналитическое прогнозирование).

Надёжность электрической машины в значительной степени определяется надёжностью обмоток, которая в свою очередь зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также во время их хранения и транспортировки они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению её свойств.

Среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции электрических машин, одним из основных является старение изоляции под действием температуры. Поскольку нагревостойкость определяется скоростью старения изоляции в условиях повышенных температур, особое значение приобретают методы расчёта скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции. [3]

Установлено опытным путем [4, 5], что для классов изоляции- выше А превышение температуры на каждые 10...12 °С сверх предельно допустимого превышения сокращает срок службы изоляции вдвое по отказу по старению. Может быть записано уравнение для любого класса нагревостойкости изоляции, которое носит эмпирический характер, однако позволяет достаточно точно оценить срок службы в случаях небольшого отрезка времени и небольшого диапазона изменения температуры [4, 5]:

$$\ln T_{cl} = \ln T_0 - n \cdot \Theta_i, \quad (1)$$

где  $T_0$  - срок службы базовый, составляет 20000 ч. [6],  $\Theta_i$  — фактическое значение превышения температуры обмотки статора над окружающей средой,  $n$  - коэффициент.

$$n = \frac{\ln 2}{\Delta \Theta}, \quad (2)$$

где  $\Delta \Theta$  - превышение температуры сверх предельно допустимого значения для выбранного класса нагревостойкости, снижающее срок службы изоляции вдвое. Превышение температуры, при котором срок службы изоляции снижается вдвое для изоляционных материалов класса F ближе к 10 °С [4, 5].

Уравнению для определения разности температур базового и энергосберегающего АД:

$$\Delta \Theta_i = \theta_b - \theta_a, \quad (3)$$

где  $\theta_a$  - температура энергосберегающего АД,  $\theta_b$  - температура базового АД.

Для оценки изменения срока службы изоляции у спроектированных АД рассчитаем по следующей формуле:

$$T_{cl}/T_0 = e^{-(n \cdot \Delta \Theta_i) / \Theta_i} \quad (4)$$

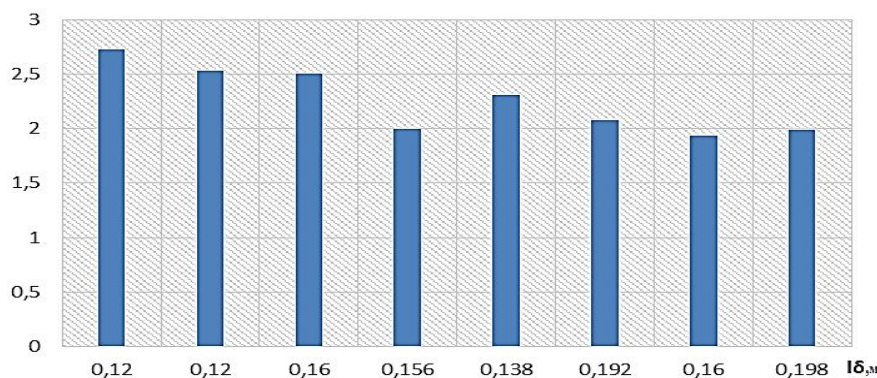
Расчет производился для четырех полюсных АД общепромышленного назначения, для двигателей со следующими параметрами  $2p=4$ ,  $U_n=220$  В,  $f=50$  Гц. В качестве базовых двигателей были выбраны машина серии АИР: АИР90L4, АИР100S4, АИР100L4, АИР112M4, АИР132S4, АИР132M4, АИР160S4, АИР160M4, т.е. взяты двигатели средней мощности от 2,2-18,5 кВт и высотой оси вращения от 90 до 160 мм.

В таблице 1 представлены данные изменении срока службы изоляции при использовании энергосберегающих АД при сохранении поперечной геометрии.

**Таблица 1.** Данные срока службы изоляции при использовании энергосберегающих АД

$P_2$ , кВт	$l_\delta$ , м	$\Delta\theta_i$ , °С	$T_{сл}/T_0$ , о.е.	$T_{сл}$ , часы	
АИР90L4	2,2	0,12	16,7	2,729	54590
АИР100S4	3,0	0,12	11,36	2,53	50600
АИР100L4	4,0	0,16	13,26	2,509	50180
АИР112M4	5,5	0,156	9,25	2	40000
АИР132S4	7,5	0,138	10,81	2,309	46190
АИР132M4	11,0	0,192	10,29	2,079	41580
АИР160S4	15,0	0,16	7,66	1,937	38740
АИР160M4	18,5	0,198	8,8	1,993	39860

На рисунке 10 представлена гистограмма увеличения изменение срока службы изоляции.



**Рис. 1.** Изменение срока службы изоляции при использовании энергосберегающих АД при сохранении поперечной геометрии

При реализации предложенного способа проектирования энергосберегающих АД снижение температуры обмотки статора над окружающей средой достигает  $(8 \div 17)^\circ\text{C}$ . За счет снижения температуры нагрева повысится срок службы изоляции спроектированных АД по сравнению с базовыми в среднем в 2,5 раза. При этом срок службы энергосберегающих АД составит для двигателей разных высот осей вращения от 38740 до 54590 часов.

Поводя итоги расчета, следует отметить, что энергосберегающий АД обладают не только лучшими показателями энергоэффективности, но и повышенной надежностью, более высоким сроком службы, что позволит повысить их конкурентоспособность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. // ТЭК. – 2003. – № 2. – С. 5–37.
2. ГОСТ Р 52776-2007 Машины электрические вращающиеся.
3. Воробьев В.Е., Кучер В.Я. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции. – СПб.: СЗТУ, 2004 Ермолин Н.П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. - Л: Энергия, 1976. — 248 с.
4. Котеленец Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. - М.: Высшая школа, 1988. - 231
5. ГОСТ 8865-93. Система электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХКОНТУРНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДПТ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ MEHBIOS

Борисов С.В., Родионов Г.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

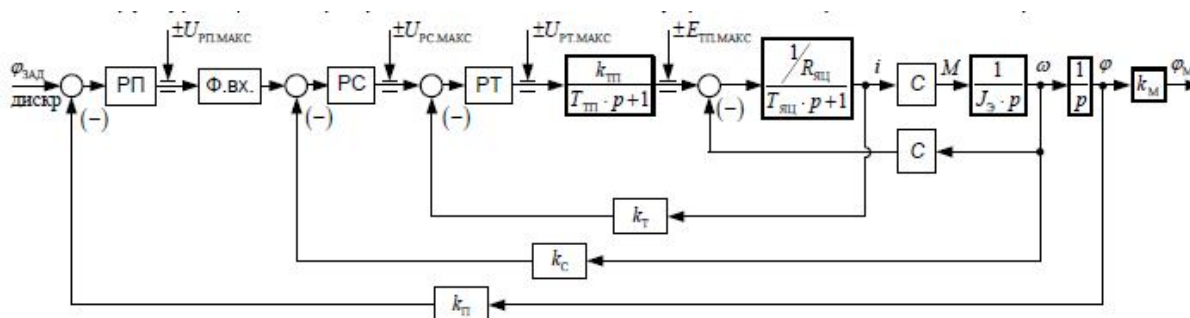
Создание цифровых систем управления реального времени для электромеханических объектов является нетривиальной задачей, решение которой требует применения комплексных знаний в областях взаимодействия программно аппаратных звеньев нижнего уровня с особенностями проектирования АСУ.

Спектр задач решаемых на программируемых контроллерах усложняет процесс создания специализированного программного обеспечения с учетом новых решений в области разработки цифровых систем управления автоматизированных электроприводов. В частности приходится использовать цепочку специалистов: от специалиста предметной области до программиста специализированных контроллеров. Это приводит к удорожанию разработки нового устройства из-за увеличения времени разработки так и из-за возникающих ошибок в процессе реализации идеи специалиста программистом в конечном продукте[1].

Актуальным вектором развития программирования является перевод среды из текстовой среды в визуальные блок схемы. Данный подход позволяет исключить специалиста в программировании между инженером и конечным продуктом.

Цель данной статьи показать возможность синтеза трёхконтурной системы управления двигателя постоянного тока методом визуального программирования в программной среде MexBIOS, разработанной в лаборатории Микропроцессорных систем управления электроприводами НИ ТПУ[2].

Система управления реализована по принципу подчинённого регулирования и включает в себя три контура регулирования: тока, скорости и положения. Структурная схема разрабатываемой системы управления представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структурная сема трёхконтурной системы подчиненного управления двигателем постоянного тока

Первый этап программирования – создание адекватной модели объекта регулирования: источник питания 24В и двигателя марки SVF5539[3]. Для моделирования системы управления электроприводом используется готовый блок модели ДПТ в среде MexBIOS. На рис. 2 представлена блок схема, собранная в интегрированной среде и представлен график имитационного моделирования.

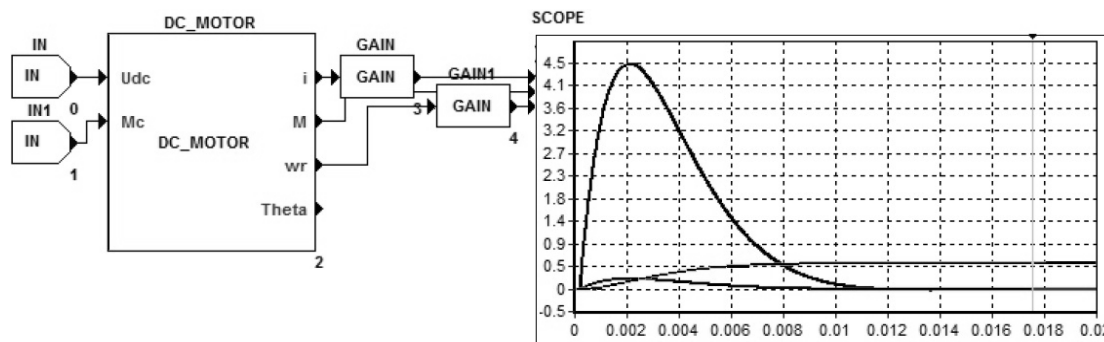


Рис. 2. Модель объекта регулирования

На работу системы будет существенно влиять дискретность системы, т.к. шаг расчет практически равен величине постоянной времени. Соотношение между частотой квантования и полосой пропускания должна быть более  $f_{KB}/f_{V.T.}$ . Кроме того, обеспечивать полосу пропускания в контуре тока более 200-500 Гц, как правило, не нужно [5].

Тогда при настройке можно сделать следующие допущения:

- с учетом максимальной частоты расчет в ядре микроконтроллера 10 кГц аperiodическим звеном пренебрегаем;
- обратную связь считаем безынерционной и настроенной на коэффициент  $k_T=1$ ;
- требуемая полоса пропускания в контуре тока  $f_{V.T.} = 200$  Гц.

В данном случае контур можно настроить на аperiodический переходный процесс для последующей настройки контуров скорости и положения по методике Кесслера. На рис. 3 представлен схема контура тока и на рис. 4 результат имитационного моделирования настройки.

Вид переходных процессов, соответствует настройке на аperiodический процесс. Время переходного процесса составляет 2.4 мс.

Настройка контура скорости может быть произведена на симметричный оптимум с фильтром на выходе по известной методике [6]. Для уменьшения величины перерегулирования на вход контура скорости устанавливается аperiodический фильтр первого порядка с постоянной времени  $T_f = T_{PC}$ .

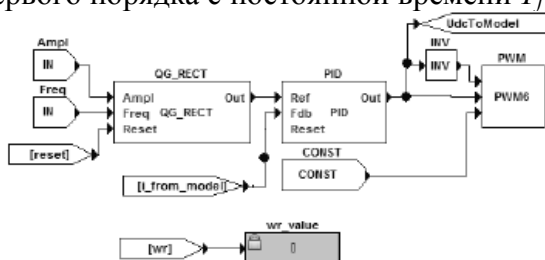


Рис. 3. Схема контура тока

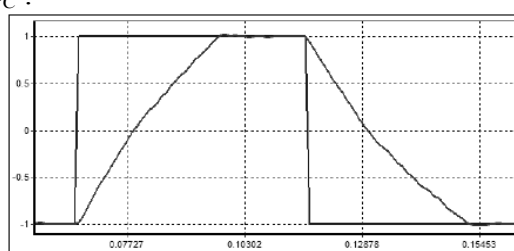


Рис. 4. График переходных процессов имитационной модели контура тока

Схема контура тока в программной среде MexBIOS выглядит следующим образом (рис. 5.)

Из-за того, что сигнал скорости вычисляется из сигнала положения с использованием дифференцирования (блок SPEED\_FR) полученное значение коэффициента усиления регулятора и постоянной интегрирования будет вызывать вибрации двигателя. Для нормальной работы контура скорости необходимо взять в десять раз меньше полученных при расчете.



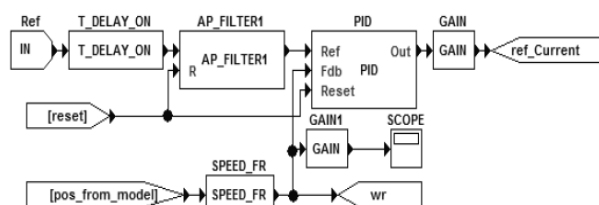


Рис. 5. Схема контура скорости

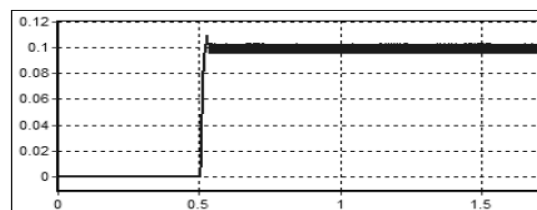


Рис 6. Переходные процессы имитационной модели контура скорости

Проверку работоспособности контура необходимо проводить в линейной зоне, когда регулятор тока и скорости не входит в насыщение [7].

Контур положения настраивается на модульный оптимум согласно известным методикам. Схема контура положения в программной среде MexBIOS и результаты моделирования при задании 100 дискрет представлен на рис. 7 и рис. 8.

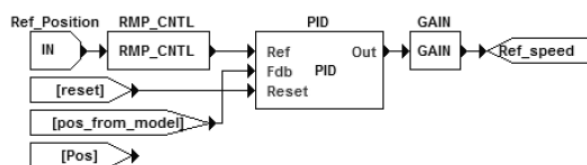


Рис. 7. Контур управления положением

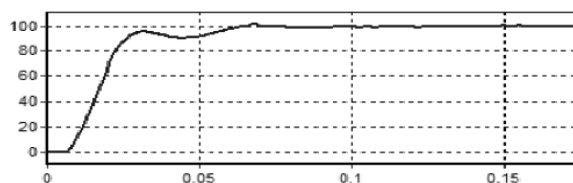


Рис. 8. Переходной процесс положения в имитационной модели при задании 100 дискрет.

Вывод: Отличием предложенной трехконтурной системы управления является применение собственного открытого программного обеспечения, которое позволяет в короткий срок запустить систему управления на контроллере, возможность создания с нуля цифровых систем управления при отсутствии навыков программирования. Так же в отличие от существующих систем, в MexBIOS задействуются «предустановленные» возможности управляющего микропроцессора, что исключает необходимость создания и компиляции программного кода, его загрузки в память без применения специальных средств типа JTAG-программаторов (загрузка через USB или RS232).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каракулов А. С., Гусев Н. В., Родионов Г. В., Сливенко М. В. Современная технология разработки цифровых систем управления электроприводами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2011 №. 6, стр. 46–51.
2. ООО « НПФ Мехатроника-Про». [Электронный ресурс] – электрон. текст. Дан. Начало работы – руководство для новых пользователей. – Томск : [б.и.], 2011-2014 – Режим доступа : <http://www.mechatronica-pro.com/ru/blog/>
3. ООО « НПФ Мехатроника-Про». [Электронный ресурс] – электрон. текст. Дан. Методика создания системы управления двигателем постоянного тока – Томск: [б.и.], 2011-2014 – Режим доступа: [http://www.mechatronica-pro.com/upload/products/positions/files/Technical\\_Manual\\_mZdsp\\_2812\\_V1\\_02\\_Rev\\_1\\_33\\_RU\\_file\\_75\\_45\\_3871.pdf](http://www.mechatronica-pro.com/upload/products/positions/files/Technical_Manual_mZdsp_2812_V1_02_Rev_1_33_RU_file_75_45_3871.pdf)
4. TMS320x281xAnalog-to-Digital Converter(ADC) Reference Guide”,Texas Instruments,Literature Number:SPRU060D,June2002

5. Кояин Н. В., Мальцева О. П., Удут Л. С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия Томского политехнического университета – 2005 №7, стр 120-125.
6. Vandana Govindan T.K, Anish Gopinath, S.Thomas George. DSP based Speed Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor// IJCA Special Issue on “Computational Science - New Dimensions & Perspectives” - NCCSE, 2011
7. G. MadhusudhanaRao et al. “Speed Control of BLDC Motor Using DSP” International Journal of Engineering Science and Technology ,Vol. 2(3), 2010.

## ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВПИТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ С ВОДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДОЙ

Олиферович Н.М., Рыжова О.С., Якута Е.А.

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

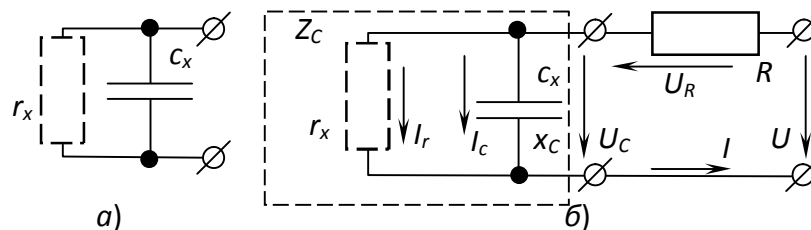
Существует ряд приборов, работа которых основана на преобразовании физических явлений в изменение емкости: емкостные уровнемеры, емкостные манометры, датчики, преобразователи влажности воздуха и т. д. [1-3]. Также с помощью данного подхода возможен анализ динамики пропитки фильтровальной бумаги водой [4].

Емкостной преобразователь, параметры которого зависят от измеряемой физической величины, включается в измерительную цепь. Данные схемы могут быть построены на различных принципах, однако наибольшее распространение получили приборы на основе преобразования емкости в частоту (время) за счет использования мультивибраторных (одновибраторных) генераторов [5], а также устройства, работа которых основана на использовании резонансных контуров. Учет наличие паразитивной составляющей в емкостном преобразователе легче путем использования схем определения полного сопротивления, но такие приборы значительно сложнее в изготовлении и требуют использования микропроцессорных элементов для их реализации.

Проведенные эксперименты по изучению динамики пропитки фильтровальной бумаги на базе прибора Е7-12, для различных жидкостей показали (таб. 1) [5], что диапазон изменения параметров схемы замещения (рис. 1) измерительного преобразователя достаточно широк. Особенно это касается паразитивного активного сопротивления  $r_x$ . Однако в случае контроля скорости распространения фронта по одному направлению измерительного преобразователя, его значения уменьшатся примерно в два раза.

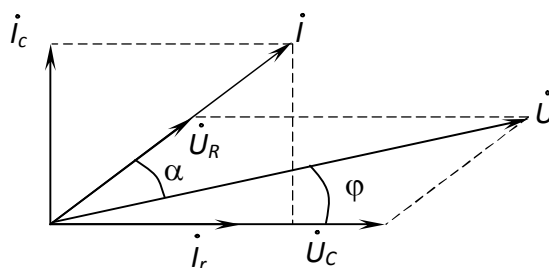
**Таблица 1.** Диапазон изменения параметров схемы замещения измерительной ячейки

Среда	Диапазоны проводимостей, mS	Диапазоны емкостей, нФ
Вода	0,08 - 6,14	0,502 - 4,73
Суспензия с глиной	0,24 - 6,20	0,501 - 4,26
Масло	0,09 - 0,14	0,501 - 1,46



**Рис. 1.** Схема замещения измерительной ячейки (а) и измерительная схема эксперимента определения частотных характеристик (б)

Прибор Е7-12 производит измерения на частоте 1 МГц. Для оценки динамических свойств на других частотах был проведен ряд экспериментов. С этой целью последовательно с измерительным конденсатором (первичный емкостной преобразователь) включали дополнительное активное сопротивление  $R$  и полученная схема подключалась к генератору с переменной частотой. В процессе измерения на различных частотах контролировали напряжение на измерительном конденсаторе  $U_c$ , напряжения на добавочном сопротивлении  $U_R$  и входное напряжение  $U$ . Для повышения точности измерения добавочное сопротивление в процессе измерения подбиралось таким образом, чтобы углы  $\varphi$ ,  $\alpha$  и их сумма была больше  $10^\circ$ , но меньше  $80^\circ$  (рисунок 2). Напряжение в измерительной цепи было порядка 10 В, частота изменялась в диапазоне от 10 до 1МГц.



**Рис. 2.** Векторная диаграмма измерительной схемы

Измерения проводились на сухой и смоченной бумаге. Для получения смоченной бумаги с различным количеством воды постепенно добавлялись порции 6 мл и выдерживалось время до полного впитывания. Объемы порций были выбраны исходя из желаемого числа контрольных точек и максимального объема впитывания 17 – 19 мл образцом фильтровальной бумаги, который был определен экспериментальным путем. Емкостной первичный преобразователь подключался к генератору синусоидальных колебаний, и проводились измерения на контрольных частотах. В начале и в конце измерения с помощью прибора Е12-7 проводился контроль параметров схемы замещения. После выполнения серии измерений для образца с заданным количеством впитанной воды добавлялась следующая порция. Серии измерений эксперимента повторялись три раза, полученные результаты усреднялись.

В результате проведенных измерений было отмечено, что с учетом незначительной выдержки времени для впитывания после добавления порции воды, а также с учетом длительности измерения по заданным частотам не более 6 – 8 мин при выполнении контроля параметров схемы замещения с помощью Е7-12, было зафиксировано изменение параметров бумаги во времени. При этом, чем больше воды напиталось бумагой, тем больше могло быть расхождение в результатах (до 8%) в сторону увеличения емкости.

Результаты зависимости параметров схемы замещения от частоты можно наблюдать на графиках (рис. 3 – 5).

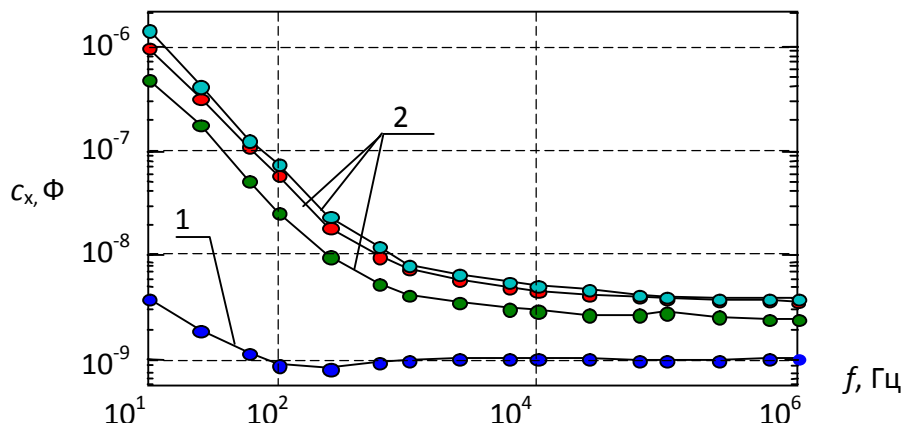


Рис. 3. Зависимость емкости  $c_x$  от частоты  $f$  для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

Использование сх для идентификации динамики пропитки может быть положено в основу любого из принципа построения преобразователей. Где-то, начиная с 2,5 кГц, зависимость емкости от частоты минимальна.

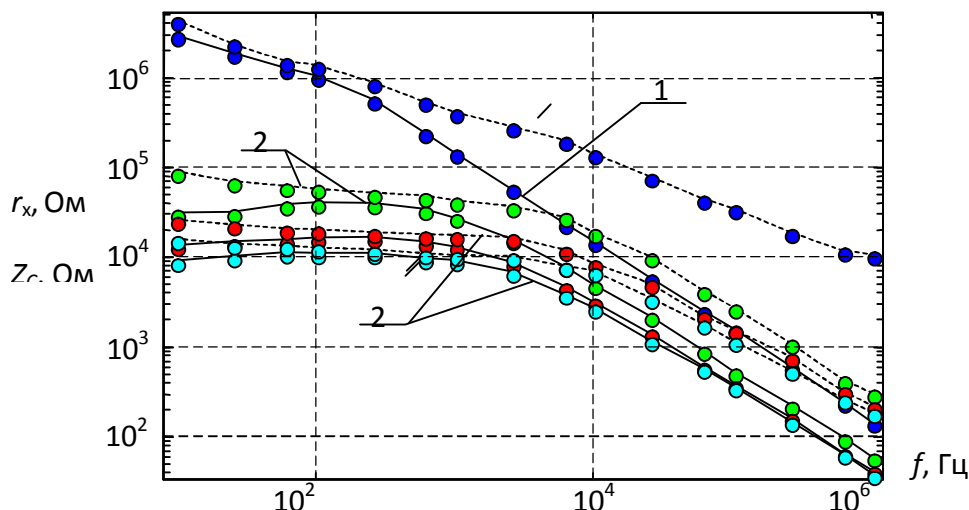


Рис. 4. Зависимость  $r_x$  (---) и  $Z_c$  (—) для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

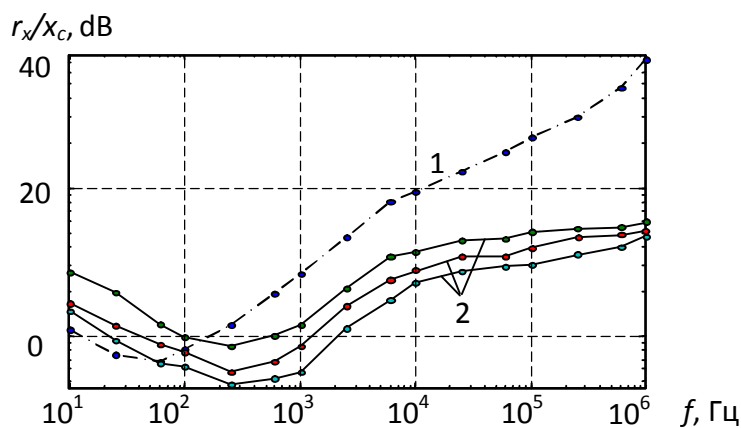


Рис. 5. Зависимость  $r_x$  к  $c_x$  от частоты для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

Кроме этого, увеличивается отношение между сопротивлениями  $r_x$  и  $x_c$ , что позволит получить информацию о координате через определение емкости и уменьшить влияние  $r_x$ , на точность измерения. Однако сдвиг рабочего диапазона преобразователей в сторону увеличения частоты будет приводить к увеличению токов, поскольку сопротивление стремительно снижается и уже на частоте 100 кГц становится меньше 1 кОм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шишмарев, В. Ю. Средства измерений: учебник для студ. учреждений с проф. образования / В. Ю. Шишмарев. – 4-е изд., стер. – М. Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.
2. Сошинов, А. Г. Преобразователи неэлектрических величин: Учеб. пособие./ ВолгГТУ, Волгоград, 2002. – 36 с.
3. R.S. Khandpur. Handbook of Analytical Instruments. – 2nd Revised edition – London: McGraw-Hill Professional, 2006. – 770 p.
4. Гринюк, Д. А. Устройство непрерывного измерения процесса смачивания/ Д. А. Гринюк, И. О. Оробей, Н. М. Богослав // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. - 2011. - Вып. XVIII. - С.108–112.
5. Vladimir Mitrovic. Pico C.//Elektor Electronics №4 2011 – С. 24-29

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТАХ ПРИ СТЕКАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ С ЗЕЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Ивонин В.В.

Кольский научный центр РАН, Россия, г. Апатиты

Заземляющее устройство является важным компонентом любой энергосистемы в отношении защиты людей и оборудования от внутренних перенапряжений, а также от внешних, вызванных разрядами молний. Основное требование к данным устройствам – минимальные значения их сопротивления относительно удаленной земли для обеспечения достаточно низкого потенциала на них. Известно, что сопротивление заземлителей зависит от их конструкции и удельного сопротивления окружающего грунта.

Грунт представляет собой совокупность веществ, включающих воду, воздух, гравий, песок, глину, минеральные и органические соединения. Свойства этих веществ влияют на электрические характеристики грунта. И хотя характеристики пробоя жидких, твердых и газообразных диэлектриков хорошо изучены [1], физическая модель, которая была универсальной в отношении характеристик пробоя составных грунтов ещё не разработана. Поэтому изучению электромагнитных процессов, протекающих в заземлителях и прилегающих к ним грунтах, уделяют большое внимание, особенно в районах с высоким удельным сопротивлением грунта, к которым относится Кольский полуостров.

Принято считать, что электрическое поле, созданное большими токами, приводит к появлению искровых каналов в водной среде и по газовым включениям в грунте, окружающем электрод [2]. Так как удельное сопротивление плазмы в этих каналах ниже, чем удельное сопротивление окружающего грунта, происходит существенное уменьшение сопротивления заземляющего электрода. Это явление обычно называют ионизацией грунта или искрообразованием в грунте.

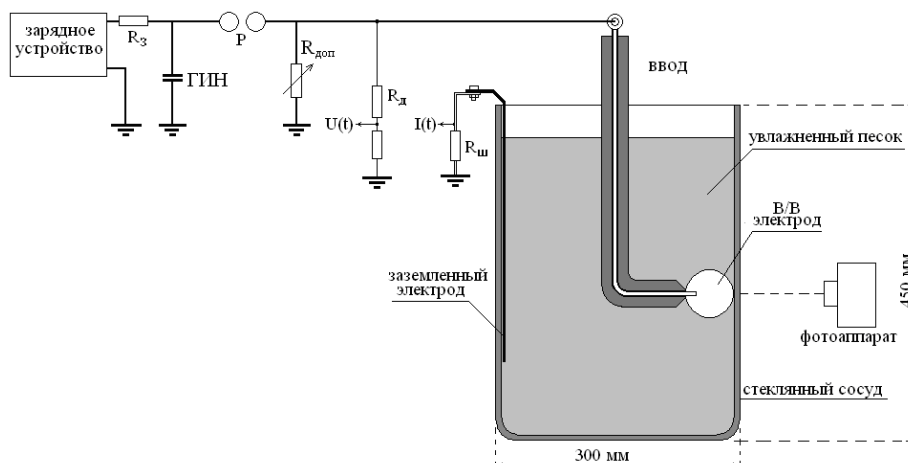
В данной работе приведены результаты лабораторных исследований нелинейных процессов при стекании импульсных токов с заземлителей. Целью работы было определить зависимость импульсного сопротивления заземлителя от параметров приложенного импульса (амплитуда и длительность) и влажности окружающего грунта. Эксперименты проводились для заземлителей разной конфигурации.

Импульсным характеристикам грунта посвящено множество работ. Многие ученые занимались изучением процессов искрообразования и ионизации грунта. Основным параметром этих процессов является критическая напряженность электрического поля ( $E_c$ ), при которой в грунте начинаются процессы ионизации и искрообразования.

В данной работе мы рассматриваем импульсное сопротивление заземлителей:

$$Z(t) = \frac{U(t)}{I(t)} \quad (1)$$

На рис. 1 приведена схема генераторной установки с ее основными параметрами, сопряженной со стеклянным резервуаром с увлажненным кварцевым песком, в котором был размещен электрод. Генератор импульсных напряжений (ГИН) выполнен по классической схеме Аркадьева-Маркса. ГИН имеет емкость в ударе 0,05 мкФ. Сопротивление формирующего резистора ( $R_{доп}$ ) изменялось в диапазоне от 50 Ом до 20 кОм. Напряжение на выходе ГИН регулировалось источником зарядного напряжения и искровым шаровым промежутком.



**Рис. 1.** Схема генераторно-измерительной установки

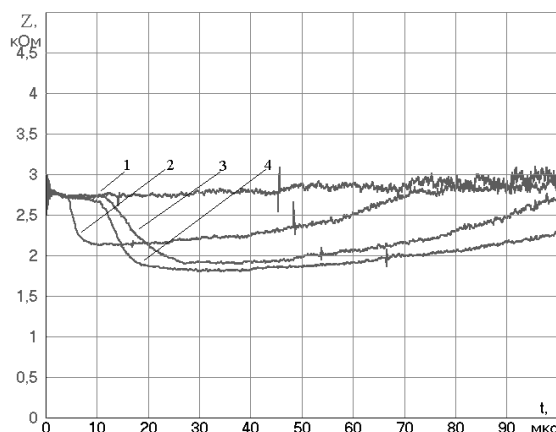
Для измерения импульсных напряжений на электроде использовался омический делитель, высоковольтное плечо которого равнялось  $R_d = 20$  кОм. Токи, протекающие через грунт, регистрировались с помощью мостового шунта, выполненного по схеме Пашена [3]. Сопротивление шунта  $R_{ш} = 0,39$  Ом.

Стеклянный резервуар использовался для проведения, помимо осциллографических исследований, оптических наблюдений процессов искрообразования.

Исследования проводились для двух типов электродов (шара и диска) при разных влажностях грунта (10% и 20%). Амплитуда генерируемого импульса изменялась от 10 до 60 кВ, длительность напряжения на полувывоте ( $\tau$ ) от 1 до 80 мкс, фронт импульса равен примерно 1 мкс.

Электродная система с однородным полем вблизи электрода.

Электрод представляет собой латунный шар диаметром 30 мм. На рис. 2 представлены импульсные сопротивления электродной системы при разных длительностях напряжения. Амплитуда импульса 30 кВ. Влажность грунта 10 %.



**Рис. 2.** Импульсное сопротивление сферического электрода при разных длительностях приложенного импульса напряжения  
 1 –  $\tau = 35$  мкс, 2 –  $\tau = 45$  мкс, 3 –  $\tau = 64$  мкс, 4 –  $\tau = 80$  мкс

Увеличение длительности импульса напряжения приложенного к электроду приводит к резкому уменьшению импульсного сопротивления электрода, что в свою очередь связано с возникновением и увеличением искровых каналов в грунте. Однако, как видно из рис. 2, увеличение длительности импульса более 64 мкс не приводит к значительным изменениям импульсного сопротивления.

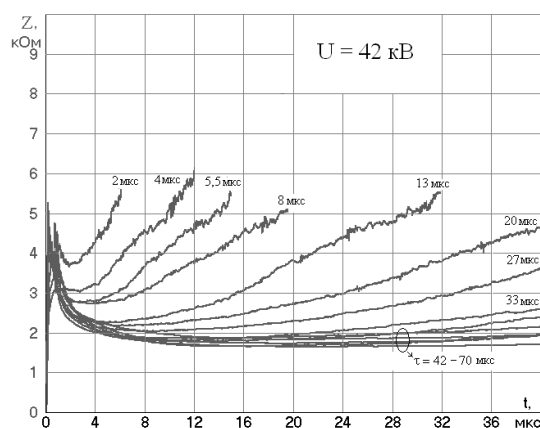
При увеличении влажности грунта до 20 % процессы искрообразования не возникали вплоть до амплитуды импульса напряжения 48 кВ. При амплитуде 54 кВ искровые процессы в грунте возникали, однако изменение длительности импульса не приводило к значительным изменениям импульсного сопротивления электрода.

Оптически процессы искрообразования не наблюдались. Это связано с тем, что стекло сильно искажает распределение электрического поля вокруг сферического электрода [4].

Электродная система с резконеоднородным полем вблизи электрода.

В данной серии опытов использовался электрод в виде тонкого диска, касающегося стекла в емкости с влажным грунтом. Параметры диска: диаметр  $D = 21,5$  мм, толщина – 1 мм. Целью исследования было нахождение корреляции между параметрами искрообразования, регистрируемыми осциллографическим и оптическим методами.

Ниже приведены результаты опытов при влажности грунта 10 %, напряжении ГИН 42 кВ и длительности импульса 2 – 70 мкс.

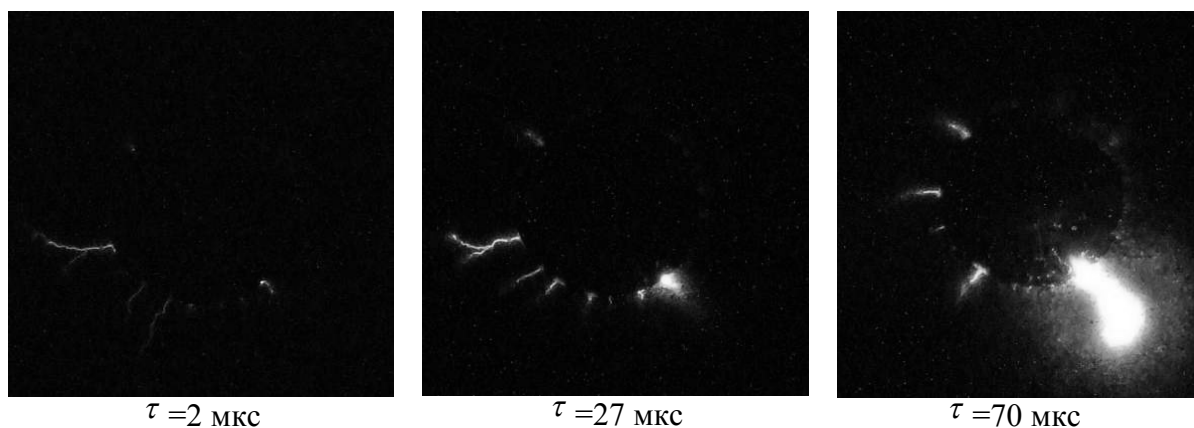


**Рис. 3.** Импульсные сопротивления электродной системы в виде диска при разных длительностях приложенных импульсов напряжения

В отличие от сферического электрода, в данной серии опытов искровые каналы начали возникать в грунте уже при амплитуде импульса напряжения 30 кВ. Это связано с тем, что электрическое поле вокруг диска распространяется неравномерно и концентрируется на боковой поверхности диска. Таким образом, даже при относительно небольшой амплитуде импульса, напряженность электрического поля на боковой поверхности диска будет достигать критического значения, в результате чего от неё будут развиваться искровые каналы.

Как видно из рис. 3, при амплитуде импульса 42 кВ искровые процессы в грунте возникают даже при очень коротких импульсах (2 мкс). Как и в предыдущей серии опытов, увеличение длительности импульса приводит к уменьшению импульсного сопротивления электродной системы.

Одновременно с осциллографическими исследованиями, в работе проводились оптические наблюдения процессов искрообразования в грунте. На рис. 4 приведены фотографии, полученные в результате данных экспериментов.



**Рис. 4.** Фотографии искровых процессов вокруг электрода

Полученные фотографии хорошо соответствуют полученным осциллограммам. Увеличение длительности приложенных импульсов напряжения приводит к увеличению интенсивности искровых каналов, их размерам и яркости. Единственное расхождение наблюдается при длительностях импульса более 33 мкс, когда увеличение длительности перестает оказывать влияние на импульсное сопротивление электрода, хотя по полученным фотографиям видно, что характер процесса искрообразования изменяется.

**Заключение.**

Импульсное сопротивление электрода в грунте зависит от уровня напряжения. С ростом напряжения примерно пропорционально снижается значение установившегося сопротивления электрода в грунте.

Процесс образования искровой зоны в грунте вокруг электрода, увеличивающий поверхность стекания и, соответственно, снижающий сопротивление электрода относительно грунта, является процессом крайне медленным относительно времени нарастания напряжения.

При однородных полях вблизи электрода наблюдается запаздывание начала искрообразования при напряженностях поля, превышающих напряженность начала искрообразования. Время запаздывания в зависимости от напряжения лежит в интервале от 1 до 15 мкс.



Увеличение влажности грунта приводит к уменьшению стационарного сопротивления заземлителя, однако в данном случае процессы искрообразования начинаются при больших значениях амплитуды приложенного импульса напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.В. Техника высоких напряжений / под ред. М.В.Костенко. – М.: Высш. шк., 1973. – 528 с.
2. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
3. Данилин А.Н. Разработка высоковольтных систем генерирования и регистрации импульсов, моделирующих атмосферные перенапряжения в подземных проводниках. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Ленинград, 1990. – 231 с.
4. Данилин А.Н., Ивонин В.В. Оценка корректности оптических наблюдений процессов искрообразования вокруг электродов, размещенных в увлажненном грунте // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2013. – №4(17). – С. 32-38.

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПОВТОРНО- КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

Дрозд А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Современные тенденции развития электротехнической промышленности направлены на повышения уровня безопасности и качества эксплуатируемых изделий. Одним из показателей качества является срок службы изоляции обмоток. Снижение температуры нагрева обмоток позволяет уменьшить тепловой износ. Таким образом, можно сделать вывод, что снижение температуры обмоток электродвигателя постоянного тока для масляного насоса тепловоза и нахождение относительного теплового износа изоляции является актуальным в настоящее время.

Целью работы является изучение теплового состояния базового электродвигателя постоянного тока и нахождение способов уменьшения температуры электродвигателя при эксплуатации с целью увеличения надежности обмоток.

Электродвигатель эксплуатируется в повторно-кратковременном режиме работы, поэтому расчет температуры нагрева обмоток производится по особой методике, учитывающий продолжительность включения и остывания электродвигателя [1]. Такой метод теплового режима называется нестационарным, позволяющим найти диапазон колебания температур электродвигателя в данном режиме. То есть, температура электродвигателя варьируется между минимальным и максимальным значениями, при этом температура не достигает установившейся и не опускается до температуры окружающей среды.

Существует много разных конструктивных решений для улучшения охлаждения электродвигателя. Для охлаждения якоря или ротора применяются вентиляционные каналы [2].

Охлаждение станины и обмоток статора (индуктора) может быть наружным и внутренним. Наружный обдув осуществляется вентилятором, который устанавливается

на валу электродвигателя и с помощью кожуха, поток воздуха направляется вдоль машины, на которой располагаются ребра для лучшего отвода тепла [3]. Внутренняя поверхность станины и обмоток статора (индуктора) может охлаждать циркулирующим воздухом внутри закрытой электрической машиной [4].

Охлаждение электрической машины связано с потерями, которые приводят к выделению тепла. Поэтому, для уменьшения температуры необходимо прибегнуть к действиям, способствующим уменьшению сопротивления обмоток.

Таким образом, было принято решение рассмотреть вариант конструкции электродвигателя с аксиальной системой вентиляции с добавлением вентиляционных каналов в якорь. А так же с помощью конструктивных изменений электродвигателя уменьшить число витков обмоток.

Подводя итоги, с точки зрения технологичности и экономичности было принято решение рассмотреть четыре варианта конструкции электродвигателя ДП335:

1. Базовый электродвигатель постоянного тока;
2. Изменению подвергается ярмо якоря, добавляются аксиальные вентиляционные каналы;
3. Изменению подвергается станина, которая выполняется из листов электротехнической стали и покрывается слоем алюминия с целью соединения листов;
4. Станина выполняется из электротехнической стали 2412 и добавляются вентиляционные каналы в ярме якоря.

Для моделирования переходных процессов воспользуемся методикой нестационарных тепловых состояний. Расчет по методике позволяет найти максимальную и минимальную температуру повторно-кратковременного режима работы. Для этого воспользуемся формулами 1 и 2:

Максимальное значение температуры:

$$q_{\max} = q_{\Gamma} [1 - \exp(- t_p / T)] + q_{\min} \exp(- t_p / T) \quad (1)$$

Минимальное значение температуры:

$$q_{\min} = q_{\max} \exp(- t_o / T_{\text{охл}}) \quad (2)$$

Расшифруем значения в формулах:  $q_{\Gamma}$  - установившееся температура;  $t_p$  – время нагрева;  $t_o$  – время охлаждения;  $T$  – постоянная кривых нагрева;  $T_{\text{охл}}$  – постоянная кривых охлаждения.

Полученные значения представим в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты моделирования повторно-кратковременного режима

	Конструкция №1	Конструкция №2	Конструкция №3	Конструкция №4
Максимальная температура	Обмотка возбуждения			
	70,70	70,70	64,24	63,96
	Обмотка стабилизирующая			
	54,65	53,87	50,27	50,23
	Обмотка добавочных полюсов			
	67,37	67,24	67,14	67,06
	Обмотка якоря			
99,85	84,27	97,84	84,20	

**Таблица 1.** Продолжение таблицы

Минимальная температура	Обмотка возбуждения			
	66,25	66,17	59,84	58,20
	Обмотка стабилизирующая			
	50,63	49,67	46,74	46,27
	Обмотка добавочных полюсов			
	62,41	62,00	62,43	61,77
	Обмотка якоря			
93,56	78,53	91,14	76,63	

Резюмируя предшествующие рассуждения, мы приходим к выводу, что при повторно-кратковременном режиме, исходя из минимума температуры нагрева обмоток, наилучшей конструкцией является конструкция №4. Температура обмотки возбуждения достигает 63,96°C, температура стабилизирующей обмотки равна 50,23°C, температура добавочных полюсов и якоря равны 67,08 и 84,20°C соответственно.

Температура обмоток напрямую связана со сроком службы обмоток. Правило Монтзингера говорит, что повышение температуры на 8÷10° уменьшает срок службы изоляции в 2 раза. Срок службы обмоток электродвигателя оценивается по формуле[5].

$$F = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T 2^{\frac{\Theta(t) - \Theta_{ном}}{\Delta\Theta_{ном}}} dt \quad (3)$$

где F – относительный тепловой износ изоляции;  $\Theta_{ном}$  – номинальная рабочая температура изоляции;  $\Delta\Theta_{ном}$  – характеризует скорость износа изоляции;  $\Theta(t)$  – временная зависимость температуры изоляции; T – Длительность работы изоляции.

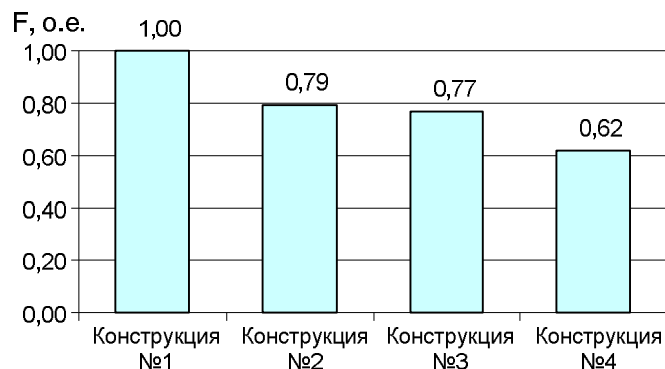
Параметр  $\Delta\Theta_{ном}$  для электрически машин равен 8°C.

Представим в относительных единицах значения теплового износа обмоток электродвигателя в табл. 2. В качестве базового параметра срока службы выберем температуры для конструкции №1. Рассматривать будем только повторно-кратковременный режим работы, так как он является основным, исходные данные температур возьмем из табл. 1.

**Таблица 2.** Относительный тепловой износ изоляции электродвигателя

Конструкция №1	Конструкция №2	Конструкция №3	Конструкция №4
Обмотка возбуждения			
1,00	1,00	0,57	0,56
Обмотка стабилизирующая			
1,00	0,93	0,68	0,68
Обмотка добавочных полюсов			
1,00	0,99	0,98	0,97
Обмотка якоря			
1,00	0,26	0,84	0,26

Данные, представленные в табл. 1, 2, позволяют утверждать, что при изменении конструкции от №1 до №4 относительный тепловой износ уменьшается. Это связано с уменьшением температуры нагрева обмоток электродвигателя. Для общей наглядности построим гистограмму на рис. 1, в которой отобразим средние значения относительного теплового износа обмоток электродвигателя при разных конструкциях.



**Рис. 1.** Средний тепловой износ изоляции обмоток электродвигателя

На рис. 1 наглядно видно, что тепловой износ изоляции значительно снижается уже при конструкции №2 и равен 0,79 о.е. Однако, при конструкции №4 износ уменьшается еще на 0,17 о.е. и становится равным 0,62 о.е.

Резюмируя предшествующие рассуждения, можно сделать вывод, что наименьшая температура обмоток электродвигателя достигается при выполнении станины из электротехнической стали 2412 и добавлением вентиляционных каналов в ярме якоря. Самой нагретой обмоткой в данной конструкции является обмотка якоря, значение температуры которой равна 84,20°С. Средний тепловой износ изоляции обмоток равен 0,62 о.е., то есть срок службы изоляции обмотки увеличивается в 1,61 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: Учеб. для вузов по спец. «Электромеханика»/Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. -239 с.: ил.
2. Охлаждение промышленных электрических машин/ А. И. Бориссенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с., ил.
3. Конструкция электрических машин : Учеб. пособие для вузов / А. Е. Алексеев. - М. ; Л. :Госэнергоиздат, 1958. - 426 с.
4. Видеман Е., Келленберг В. Конструкции электрических машин. Сокр. Пер. с нем. Под ред. Б. Н. Красовского. Л., «Энергия», 1972. – 520 с. с ил.
5. Ермолин, Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.: ил.

#### РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО КАБЕЛЯ С ЗАДАНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Потеряева Н.Л.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В настоящее время номенклатура радиочастотных кабелей на российском рынке недостаточна для удовлетворения потребностей наиболее наукоемких отраслей промышленности РФ. Существующая номенклатура часто не удовлетворяет возросшим требованиям. Поэтому наиболее развитые отрасли промышленности такие, как военная и авиационная, вынуждены использовать радиочастотные кабели импортного производства. Таким образом, существует значительная потребность в выпуске новых и модернизации имеющихся отечественных конструкций радиочастотных кабелей.

Научно-исследовательскому отделу «Радиочастотные кабели» ОАО «ОКБ КП» совместно с НИ ТПУ поставлена задача разработать конструкцию и провести расчет технологических режимов производства нового кабеля, предназначенного для мультиплексной передачи сигналов между приборами, установленными на борту военного самолета, при частоте 30 МГц.

ОАО «ОКБ КП» производит кабель марки КВСФ – 75, который используется в мультиплексных системах передачи информации в диапазоне частот до 30 МГц [1].

На сегодняшний день кабель марки КВСФ-75 не удовлетворяет современным требованиям проектирования и монтажа РЭА, а также по массогабаритным показателям. Поэтому было предложено, на базе существующего кабеля марки КВСФ-75, рассчитать конструкцию и технологические режимы для производства нового кабеля, удовлетворяющего современным требованиям. Дополнительным условием разработки модифицированного кабеля является соответствие не только существующим стандартам РФ, но военному стандарту США MIL – C – 17/176D [2], что обеспечивает вывод модифицированного кабеля на международный рынок.

В соответствие с предъявляемыми требованиями, электрические параметры кабеля должны находиться в следующих пределах [2]:

- волновое сопротивление –  $77 \pm 7$  Ом;
- коэффициент затухания сигналов – не более 0,28 дБ/м при  $f = 30$  МГц;
- электрическая емкость – не более 78,7 пФ/м;
- индуктивность (минимальная) – 387 нГн/м;
- электрическое сопротивление проводников постоянному току (максимальное значение при 20 °С) – 0,093 Ом/м;
- электрическое сопротивление изоляции – 16,4 Мом/м.

Рабочий диапазон температур разрабатываемого кабеля от -55 °С до +200 °С. Модифицированный кабель должен иметь повышенный класс гибкости. Это требование обусловлено заданными условиями эксплуатации.

Существуют аналоги разрабатываемого кабеля импортного производства:

- коаксиальные и симметричные кабели MIL-C-17 (США, THERMAX CDT) [3];
- симметричный кабель M17/176-00002 (США, HARBOUR) [4];
- симметричный кабель 24 AWG single optimized shield 10612 (Raychem) [5].

Наиболее полно удовлетворяет предъявленным требованиям кабель американского производства марки M17/176-00002 [4]. Поэтому он выбран в качестве аналога и взят за основу для разработки нового радиочастотного кабеля.

Кабель марки КВСФ-75 отечественного производства наиболее близок по конструкционным, технологическим и электрическим параметрам к заданным характеристикам разрабатываемого кабеля, поэтому выбран в качестве основы для модификации конструкции [1].

В результате проведенного расчета конструкции кабеля в соответствие с заданными характеристиками и сравнения полученных результатов с характеристиками кабеля марки КВСФ-75, принято решение об изменении конструкции внутреннего проводника и системы изоляции.

Как и в американском аналоге, внутренний и внешний проводники выполняются из медной посеребренной проволоки.

На основе анализа электрических и технологических характеристик широкого класса изоляционных материалов, в качестве материалов для изоляции и корделя выбран фторопласт Ф-4Д, а для оболочки выбран фторопласт Ф-4МБ.

В результате изменения конструкции и материалов проводников и системы изоляции кабеля марки КВСФ-75, достигнуто повышение эксплуатационных характеристик

модифицированного кабеля. В то же время, расчет конструкционных параметров и электрических характеристик модифицированного кабеля в соответствии с ГОСТ 11326.0-78 [6] показал, что его характеристики соответствуют требованиям военного стандарта США [2].

Расчетные значения основных электрических характеристик разрабатываемого кабеля:

- активное сопротивление  $R_0 = 3 \text{ Ом/м}$ ;
- индуктивность  $L_0 = 0,3 \text{ мкГн/м}$ ;
- емкость  $C_0 = 66 \text{ пФ/м}$ ;
- проводимость изоляции  $G = 1,5 \text{ мкСм/м}$ .
- волновое сопротивление  $Z_B = 75 \text{ Ом}$ ;
- коэффициент затухания  $\alpha = 0,17 \text{ дБ/м}$ .

Для внедрения модифицированного кабеля на производстве требуются минимальные изменения технологической цепочки, по сравнению с кабелем марки КВСФ–75. Основные изменения в технологической цепочке заключаются в следующем:

- изготовление корделей на экструзионном и плунжерном прессах;
- введение кордельного заполнения в систему изоляции на стадии скрутки изолированных жил;
- замена червячного экструдера на плунжерный на стадии наложения изоляции.

Для подтверждения полученных в работе расчетных значений изготовлены три варианта опытных образцов модифицированного кабеля (таблица 1).

**Таблица 1.** Электрические и геометрические параметры опытных образцов кабеля

№	Материал изоляции и оболочки	Материал корделя	D по оболоч., мм	D по изол., мм	$C_0$ , пФ/м	$\alpha_{30\text{МГц}}$ , дБ/м	$Z_B$ , Ом
1	Ф-4Д (ПТФЭ) Ф-4МБ	Ф-4Д (ПТФЭ)	3,3	1,1	65,85	0,29	73
2	Ф-4МБ (ФЭП) Ф-4МБ	Ф-4МБ (ФЭП)	3,2	1,09	70,3	0,21	68
3	Ф-4Д (ПТФЭ) Ф-4МБ (с меньшим ПТР, чем в вариантах 1 и 2)	Ф-4Д (ПТФЭ)	3,3	1,1	63,3	0,21	75
Требования MIL – C – 17/176D (США)							
	Ф-4Д (ПТФЭ) PFA	Ф-4Д (ПТФЭ)	3,27	1,066	Не более 78,7	Не более 0,28	$77 \pm 7$

По требованиям проектирования и монтажа бортовой РЭА, кабель должен обладать круглой формой.

Поэтому по полученным результатам измерений и форме наиболее подходящим вариантом оказался вариант №3, где применялся материал изоляции внутреннего проводника и корделей фторопласт марки Ф-4Д и материал оболочки фторопласт

марки Ф – 4МБ. Круглая форма оболочки образца №3 получена благодаря подбору марки фторопласта и режимов экструзии.

Сравнительный анализ измеренных параметров разработанного кабеля с параметрами кабеля марки КВСФ-75 [1] и кабеля М17/176-00002 [4] показал, что полученные характеристики оказались по некоторым параметрам лучше, чем у его аналогов и соответствуют военному американскому стандарту MIL – С – 17/176D [2].

Модифицированный кабель удовлетворяет современным требованиям проектирования и монтажа радиоэлектронной аппаратуры, установленной на борту самолетов, и будет внедрен в производство. Внедрение разработанного кабеля позволит частично решить проблему импортозависимости от зарубежных производителей кабельных изделий в наиболее высокотехнологичных отраслях промышленности РФ.

Кроме того, поскольку характеристики модифицированного кабеля удовлетворяют американскому военному стандарту MIL – С – 17/176D, то возможно расширение рынка сбыта до территории стран Европы и США.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ОАО «Особое конструкторское бюро» [Электронный ресурс] / Каталог продукции. URL: <http://www.okbkr.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 03.03.2013 г.
2. MIL-C-17/176D. Cables, Radio frequency, Flexible, Twin, M17/176 – 00002 and M17/176 – 00003. – US Department of Defense. - 2011. – 5 с.
3. Carlisle interconnect technologies [Электронный ресурс] / MIL-C-17 Coaxial Cable. URL: <http://www.thermaxcdt.com>, свободный. - Загл. с экрана. – Яз. англ. Дата обращения: 20.04.2013 г.
4. Harbour industries [Электронный ресурс] / MIL-DTL-17 Coaxial Cables. URL: <http://www.harbourind.com/>, свободный. - Загл. с экрана. – Яз. англ. Дата обращения: 20.04.2013 г.
5. Raychem. TE Connectivity [Электронный ресурс] / Tyro electronics. URL: <http://www.te.com/en/home.html>, свободный. - Загл. с экрана. – Яз. англ. Дата обращения: 20.04.2013 г.
6. ГОСТ 11326.0 – 78. Общие технические требования. Кабели радиочастотные. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1978. – 36 с.

#### РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДПТ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ МЕХBIOS

Казаков Е.П.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Проектирование цифровых систем управления для приводов, в настоящее время, является первоочередной задачей, чье решение требует обширных знаний в области программирования.

Для упрощения программирования возможно применить переход из текстовой среды в визуальные блок схемы. Данный подход позволит уменьшить количество возможных ошибок при программировании.

Цель данной работы показать переходные характеристики двигателя постоянного тока при изменении частоты дискретизации микропроцессора в контуре скорости, методом визуального программирования в программной среде MexBIOS.

На первом этапе программирования необходимо создание модели объекта регулирования. Для моделирования АСУ электроприводом используют готовую модель ДПТ в среде MexBIOS. На рисунке 1 представлена блок схема и представлен график имитационного моделирования.

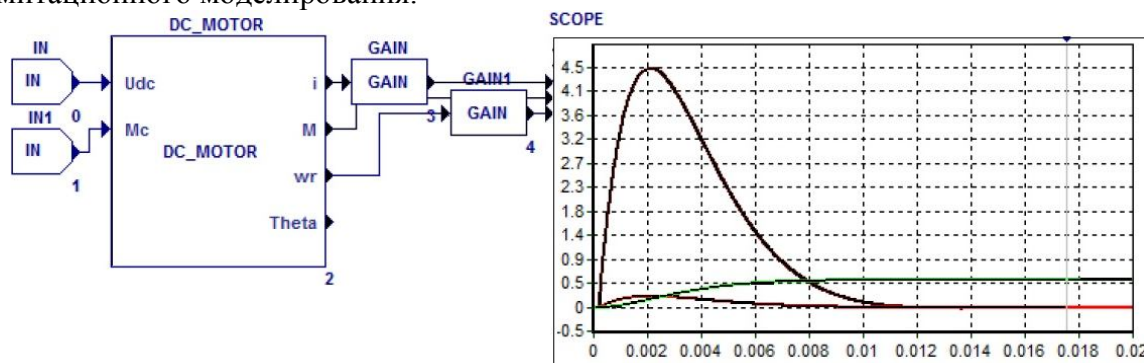


Рис. 1. Модель объекта регулирования

Вторым этапом программирования является подключение драйвера для управления АЦП, ШИМ и энкодером, а так же произвести откалибровку значений с АЦП [1].

Как правило, на работу системы будет оказывать существенное влияние дискретность системы, т.к. шаг расчета практически равен постоянной времени. Исходя из этого, можно сделать вывод, что соотношение между частотой квантования и полосой пропускания должна быть больше чем  $f_{кв}/f_{ym}$ . [2].

Тогда при настройке контуров можно сделать следующие допущения:

- с учетом максимальной частоты расчет в ядре микроконтроллера 10 кГц апериодическим звеном пренебрегаем;
- обратную связь считаем безынерционной и настроенной на коэффициент  $k_{\tau}=1$ .

Третьим этапом программирования является последовательная настройка контуров ДПТ.

Контур тока и контур скорости настроили по методике Кесслера на ПИ регуляторы. Схема контура скорости и результаты моделирования представлены на рис. 2 и 3.

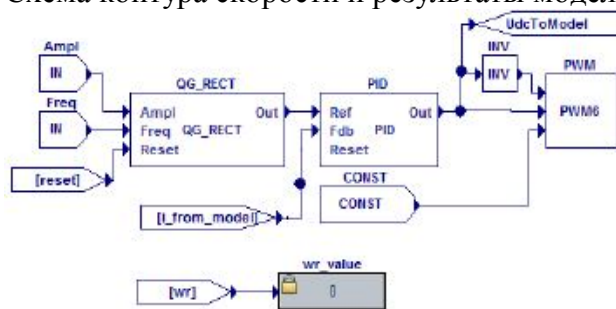


Рис. 2. Схема контура тока

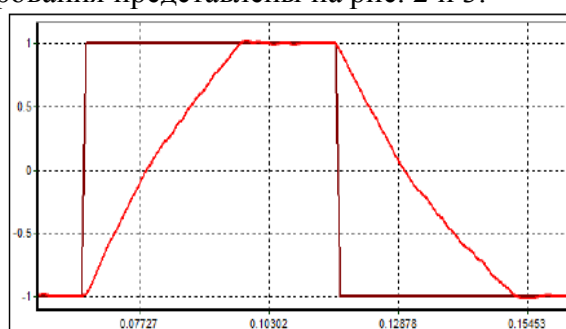


Рис. 3. График переходных процессов имитационной модели контура тока

Вид переходных процессов, в контуре тока – апериодический. Время переходного процесса составляет 2.4 мс.

Настройка контура скорости произведена на симметричный оптимум с фильтром на выходе [3]. Апериодический фильтр первого порядка установлен для уменьшения величины перерегулирования.

Схема контура скорости в программной среде MexBIOS выглядит следующим образом рис. 4.



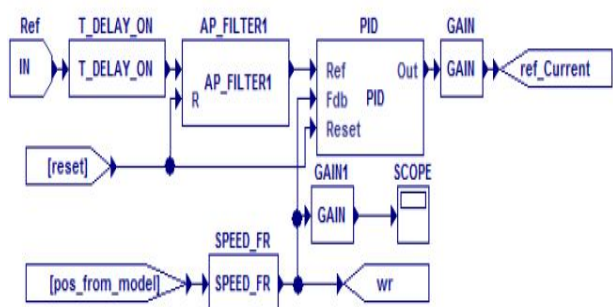


Рис. 4. Схема контура скорости

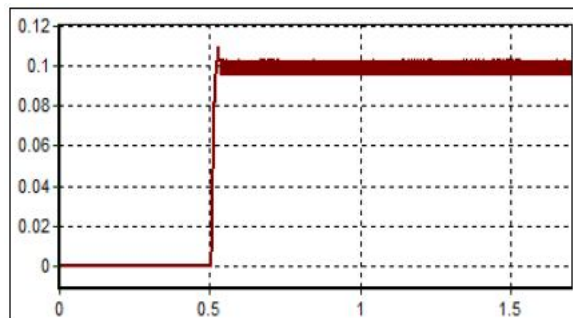


Рис. 5. Переходные процессы имитационной модели контура скорости

Из-за того, что сигнал скорости вычисляется с использованием дифференцирования (блок SPEED\_FR) полученное значение коэффициента усиления регулятора и постоянной интегрирования будет вызывать вибрации двигателя. Для нормальной работы контура скорости необходимо взять  $k_{FC}$  в десять раз меньше полученных при расчете.

Проверку работоспособности контура необходимо проводить в линейной зоне, когда регулятор тока и скорости не входит в насыщение. [4].

Эксперименты с изменением частоты дискретизации проведены при следующих данных: 2 кГц, 1 кГц, 500 Гц и 200 Гц. На рис.6-9 приведены временные диаграммы полученные в контуре тока при использовании генератора прямоугольных импульсов QG\_RECT.

На рис.6–9 показаны переходные процессы контура скорости.

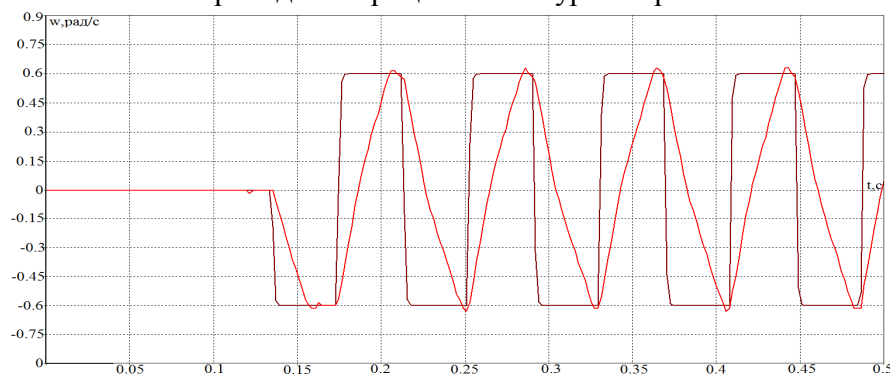


Рис. 6. Отработка задающего воздействия в контуре скорости при частоте дискретизации  $f = 2$  кГц

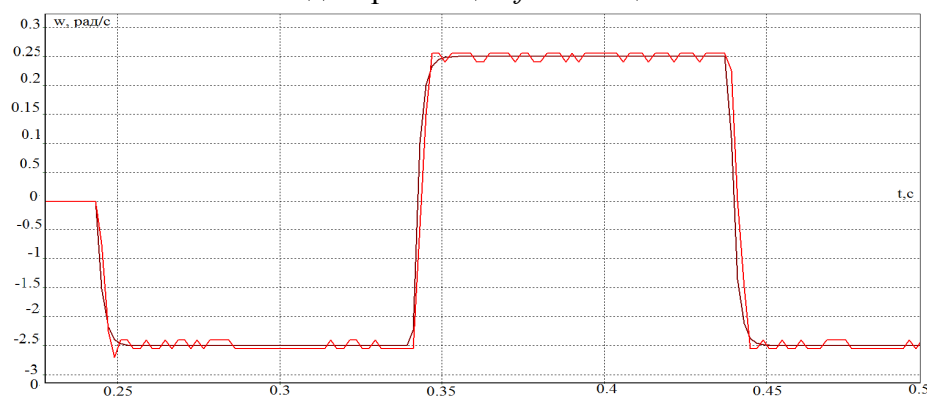
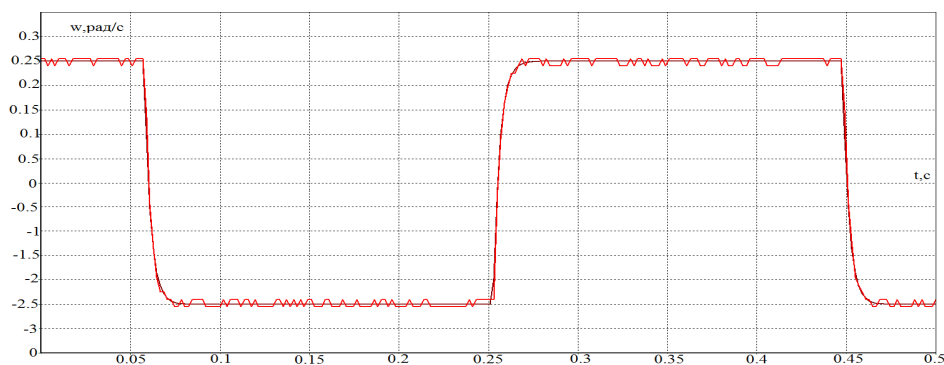
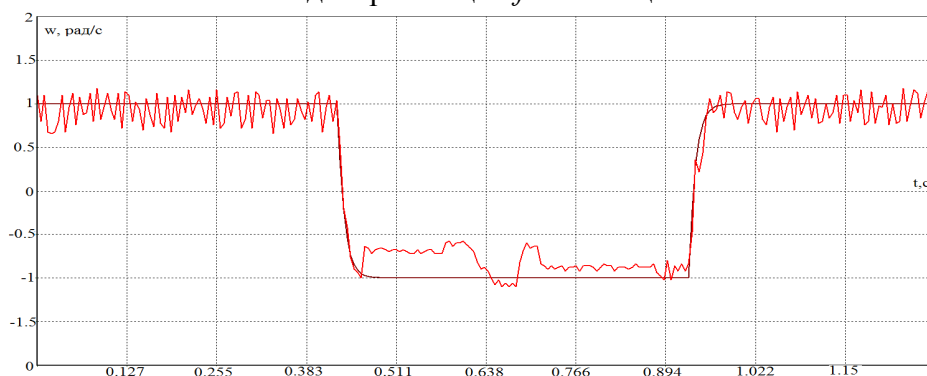


Рис. 7. Отработка задающего воздействия в контуре скорости при частоте дискретизации  $f = 1$  кГц



**Рис. 8.** Обработка задающего воздействия в контуре скорости при частоте дискретизации  $f = 500$  Гц



**Рис. 9.** Обработка задающего воздействия в контуре скорости при частоте дискретизации  $f = 200$  Гц

Выводы: На представленных выше диаграммах видно, что, если частота дискретизации сигнала не меньше, чем удвоенная наибольшая частота сигнала, то полученный дискретный сигнал эквивалентен сигналу в том смысле, что может быть в точности восстановлен, что мы можем наблюдать на частотах 2 кГц, 1 кГц и 500 Гц. При частоте 200 Гц наблюдается большая погрешность в обработке сигнала, как следствие не соблюдения равенства соотношений частоты дискретизации и частоты входного сигнала, т.е. видно искажение сигнала. Если сигнал будет представлен не в полной точности (увеличен период сигнала и максимальное значение), то это может привести к вибрации двигателя и не обработке входного сигнала.

Соответственно контур скорости при частоте дискретизации равной  $f = 200$  Гц и ниже не имеет необходимого запаса устойчивости, а так же наблюдается высокий уровень шума.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. TMS320x281xAnalog-to-Digital Converter (ADC) Reference Guide, Texas Instruments, Literature Number: SPRU060D, June2002.
2. Кояин Н. В., Мальцева О. П., Удут Л. С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия Томского политехнического университета – 2005 №7, стр. 120–125.
3. Vanda Goninan T.K., Amish Gopinath, S.Thomas George. DSP based Speed Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor // IJCA Special Issue on “Computational Science – New Dimensions & Perspectives” – NCCSE, 2011.
4. G. Madhusudhana Rao et al. “Speed Control of BLDC Motor Using DSP” International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(3), 2010.

## АНАЛИЗ СХЕМ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ С ПАРАЗИТИВНОЙ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА 555 ТАЙМЕРЕ

Чернышева А.Е., Кашкан М.А., Широков А.В.

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

Схемы измерения емкости могут быть построены на различных принципах, но наибольшее распространение получили приборы на основе преобразования емкости в частоту (время) или за счет использования мультивибраторных (одновибраторных) генераторов или построения резонансных контуров. Это позволяет получить достаточно простые и дешевые решения при хороших метрологических характеристиках. Однако измеряемая емкость не должна зависеть от частоты и активная составляющая измеряемого преобразователя должна быть как можно больше. Особенно чувствительна к активной составляющей схемы на мультивибраторах. В этом случае требуется снижать частоту измерения и осторожно выбирать компоненты измерительной схемы. Использование в измерительной схеме параллельного резонансного контура позволяет существенно нивелировать влияние активной составляющей, но это требует использовать индуктивные катушки, которые обладают некоторой нестабильностью, не идеальностью и использованию. Учесть паразитивные свойства легче путем использования схем определения полного сопротивления, но они преобразователи значительно сложнее в изготовлении и требованиях к микропроцессорным структурам для их реализации.

Отличительной особенностью схемы на рис. 1, является автономность от контроллера. Задачей контроллера является только фиксирование периода (времени заряда) емкости по выходному напряжению схемы и пересчет его в значение емкости.

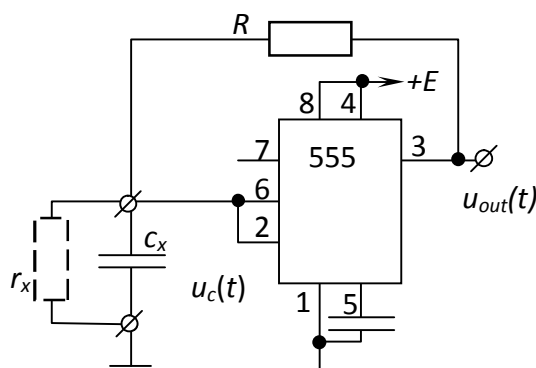


Рис. 1. Схема преобразования  $sx$  в частоту на 555 таймере

Больше возможностей для построения преобразователя на данном принципе имеют схемы на базе операционных усилителей, которые имеют меньше схематических ограничений по токам, напряжением. Изменение напряжения к цепи заряда-разряда (и)  $u_c(t)$  или напряжений срабатывания компараторов в зависимости от текущего значения  $r_x$  может позволить решить задачу устойчивого преобразования  $sx$  в частоту. Использование генератора с постоянной частотой  $u_T(t)$ , которая будет позволять заканчиваться переходному процессу можно определять соотношение между  $r_x$  и  $R$  и вводить коррекцию.

Временную характеристику напряжения  $u_T(t)$  (рис. 3) можно задавать с помощью микроконтроллера. Его смещение относительно отрицательного питания можно произвести с помощью дифференциального усилителя или компаратора.

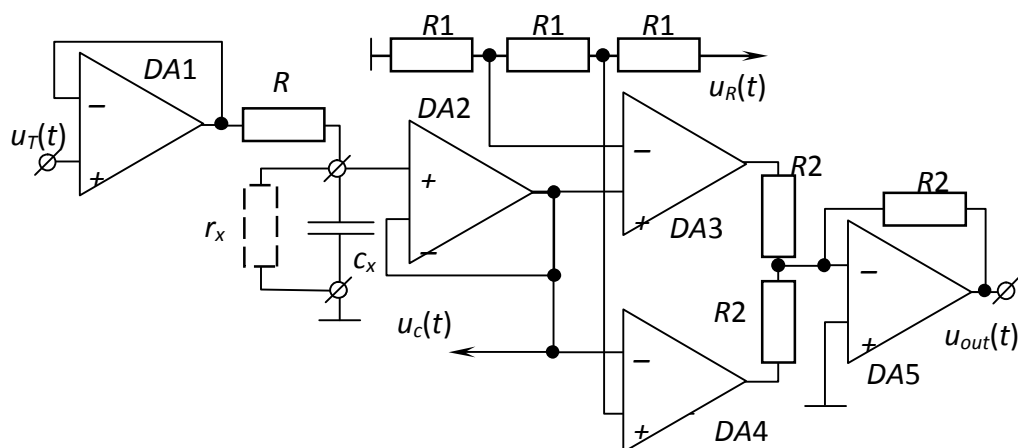


Рис. 2. Схема преобразования сх в длину импульса

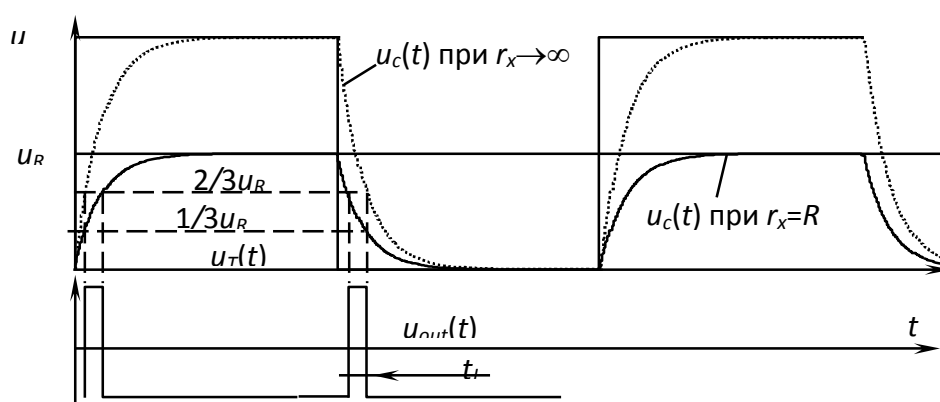


Рис. 3. Диаграмма изменений напряжений

На схеме три одинаковых резистора формируют опорные напряжения с разницей на  $1/3$  для компараторов DA3-DA4. Сумматор на DA5 сформирует импульс, который следует через ограничители подсоединяют к контроллеру. Использование сумматора позволит использовать только один дискретный вход. Измерение напряжения можно  $u_c(t)$  можно производить с помощью внутреннего АЦП. Наиболее доступные микроконтроллеры имеют встроенные АЦП с невысокой разрядности (обычно 10), поэтому лучше воспользоваться внешним АЦП или сформировав его на тех же операционных усилителях по принципу работы дельта-сигма АЦП. Такой подход позволит получить гибкость при макетировании. Особенно если учитывать, что паразитивное сопротивление меняется в широком диапазоне значений.

Напряжение  $u_R(t)$  можно формировать за счет выхода ЦАП микроконтроллера. В случае отсутствия ЦАП можно воспользоваться PWM выходом (широтно-импульсной модуляцией), который часто представлен в современных микроконтроллерах, пропустив сигнал через фильтр низкой частоты.

В целом, для реализации алгоритма преобразования емкости во временной параметр  $t_i$ , можно обойтись микроконтроллером с достаточно низкими возможностями. Три входа-выхода для  $u_{out}(t)$ ,  $u_c(t)$  и  $u_R(t)$ , и еще два для дельта-сигма АЦП. Для таких целей может подойти и ATtiny2313.

Отличительной особенностью целевого использования данной измерительной схемы является проведение одновременных измерений для двух и более конденсаторов, и упор на типизации и автономность может избежать множество ошибок при отладке.

## **ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ИЗОЛЯЦИЮ ОБМОТОКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Болгова В.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Асинхронные двигатели (АД) являются наиболее распространенным типом электрических машин благодаря простоте конструкции и высокой надёжности при условии правильной эксплуатации.

Безотказная работа электрических машин в значительной степени определяется надёжностью электрической изоляции их обмоток. В свою очередь, надёжность изоляции электрической машины зависит от ее способности противостоять длительным воздействиям различных разрушающих факторов в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатации изоляция обмоток АД подвержена влиянию температурных и механических воздействий, влаги и поверхностных загрязнений, воздействию химически активных веществ, пыли, а также действию электрического поля [1].

Основным фактором, приводящим к износу изоляции низковольтных обмоток, считалось воздействие температуры [2, 3]. И в настоящее время у потребителей отсутствует четкое понимание значимости воздействия электрического поля.

На сегодняшний день проблема надёжности обострилась в связи с интенсивностью режимов работы электрических машин, экстремальностью условий эксплуатации, повышением требований к качеству работы и, как следствие, с применением специальных систем управления. Так, использование частотного регулирования на базе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяющего осуществлять точное и эффективное управление асинхронными двигателями, привело к ужесточению электрических эксплуатационных нагрузок, значительно ускоряющих процессы электрического старения. Применение систем частотного управления обуславливает изменение процессов старения изоляции, и кроме температуры, значительный вклад вносит влияние электрического поля [4, 5].

Изменение условий эксплуатации обуславливает необходимость уточнения подхода к оценке надёжности системы изоляции обмотки низковольтных асинхронных двигателей, так как существующие методы и математические модели ориентированы на исследование процессов теплового старения и практически не учитывают влияние электрического поля [2, 3].

Особенности эксплуатации НВ обмоток в системе ЧРП обусловлены применением преобразователей частоты (ПЧ) на базе ШИМ, что приводит к воздействию быстрого нарастания напряженности электрического поля на фронте волны за счет высокой скорости коммутации ключей, как следствие, к появлению волновых явлений, перенапряжений в обмотках, повышению возникающих перенапряжений при распространении волны по кабелю от ПЧ к АД. В результате этого возникающие перенапряжения могут быть достаточными для возникновения короны в обмотке статора [6, 5].

Цель данной работы: оценить уровни воздействующих факторов на изоляцию обмотки асинхронного двигателя с частотным управлением. Для этого должны быть выполнены указанные задачи.

- изучить условия эксплуатации низковольтных обмоток в ЧРП с применением ШИМ,
- провести исследование стойкости обмоточных проводов к электротепловому старению с использованием статистических методов планирования и анализа экспериментов,

- проверить адекватность полученных результатов с применением методов дисперсионного анализа,
- определить значимость воздействующих эксплуатационных нагрузок,
- разработать рекомендации по применению межвитковой изоляции обмоток ЧРП.

Для проведения испытаний и для анализа экспериментальных данных были использованы методы факторного планирования эксперимента – ПФЭ, при котором исследуется влияние нескольких факторов и однофакторный дисперсионный анализ, для выявления значимости воздействия одного фактора, при изменении его уровней.

Наиболее слабым звеном обмотки является межвитковая изоляции, в связи с этим в данной работе проведена оценка стойкости изоляции эмалированных проводов, как основной части межвитковой изоляции. Исследовались образцы проводов марок ПЭТД-180 и ПЭТД2-К-180 двумя способами: на отрезках провода в стальной дробь и высокочастотным модулированным сигналом на стандартных скрутках.

Первый тип испытаний проведен с применением методов ПФЭ и согласно методике испытаний в системе электродов «провод-дробь». Для этого составлена матрица факторного эксперимента [7].

В ходе эксперимента устанавливались два уровня напряжения 5 и 7 кВ и температуры: 20 и 170<sup>0</sup>С. По результатам испытаний было определено среднее время до пробоя образцов, показанное на рисунке 1. Далее согласно методике ПФЭ [7] был определен эффект воздействующих факторов, показанный на рисунке 2, который показывает значительное влияние электрических нагрузок на среднее время до пробоя.

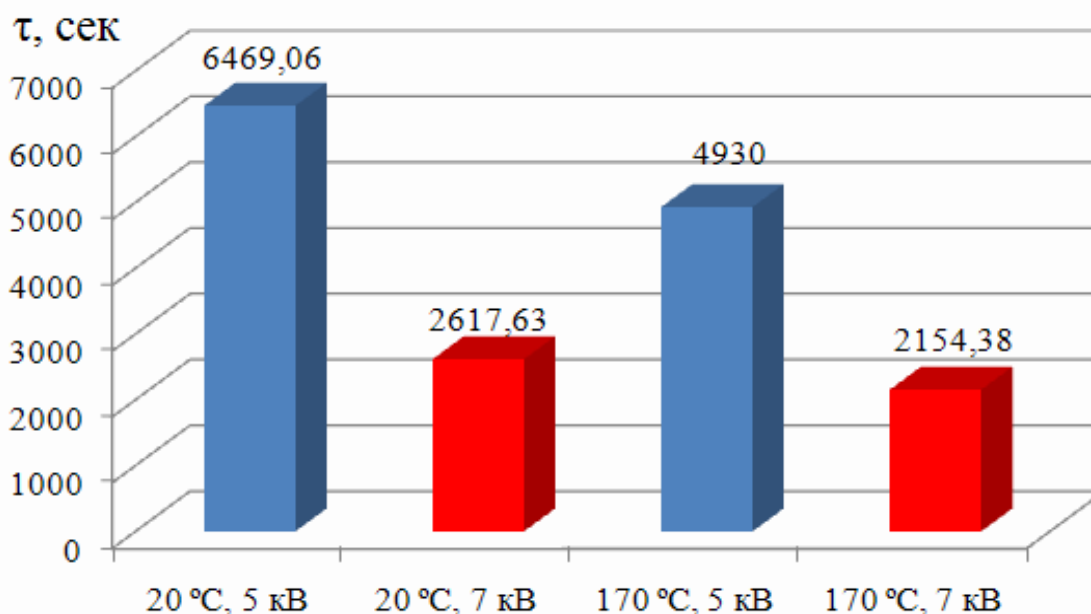


Рис. 1. Среднее время до пробоя

При однофакторном дисперсионном анализе исследуется влияние одного фактора при изменении его уровня [8]. Для этого было также определено среднее время до пробоя образцов согласно методике испытаний высокочастотным модулированным сигналом при трех уровнях температуры (рисунок 3).

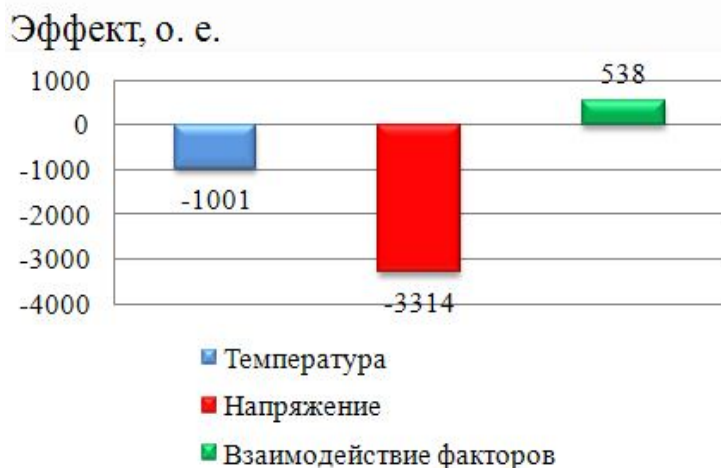


Рис. 2. Эффект факторов

На каждый уровень температуры было испытано по пять образцов, дисперсионный анализ результатов испытаний показал незначительный вклад температуры в процессы старения и разрушения изоляции при воздействии высокочастотных импульсов.

Для образцов проводов марки ПЭТД2-К-180 дополнительно определено влияние ВЧ импульсов на нагрев образцов. Измерение температуры производилось пирометром. Результаты измерения температуры образцов показывают, что испытания ВЧ-импульсами приводят к незначительному разогреву образцов (не более 5-6 °С) и не оказывают значительного воздействия на процессы разрушения изоляции.

Результаты проведенных исследований подтверждают необходимость использования короностойких материалов для изоляции низковольтных обмоток АД в условиях ЧРП.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном вкладе действия электрического поля в процессы старения и износа изоляции НВ обмоток в данных условиях. Таким образом, характер старения определен как электротепловой. В дальнейшем необходимо исследовать процессы электротеплового старения для более точной оценки короностойкости изоляции и прогнозирования ресурса обмотки.

Результаты исследований переданы в отдел главного технолога ЗАО «Сибкабель» и используются для разработки рекомендаций по применению эмалированных проводов в обмотках АД в составе ЧРП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общепромышленного применения. Изд. 2-е, перераб. И доп. М., «Энергия», 1971. - 368 с.: ил.
2. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин: учебник для студ. высших учеб. заведений / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская; под ред. О.Д. Гольдберга. - М.: Издательский центр «Академия», 2010 - 288 с.
3. Н.Л. Кузнецов. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н.Л. Кузнецов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - 432 с.: ил.
4. Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я. Волновые параметры и межвитковые перенапряжения в многовитковой вьспной обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя. Электротехника: Науч.-техн. журн. - М.: ЗАО "Знак", 2008. - №7. - С. 14-17.

5. GAMBICA/REMA Technical Guide. Variable speed drives and motors. Motor insulation voltage stresses under PWM inverter operation. Technical report No 1, 3rd Edition. – 27 pages.
6. Mark Fenger, Steven R. Campbell, & Jan Pedersen. Motor winding problems caused by Inverter Drives // IEEE Industry Applications Magazine, July/August 2003, pages (22–31).
7. Electrical Aging of the Insulation of Low-Voltage Machines: Model Definition and Test With the Design of Experiments. Nadine Lahoud, Jerome Faucher, David Malec, and Pascal Maussion. IEEE Transactions on Industrial Electronics 60(9):4147-4155 (2013).
8. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 816 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТОКА

Пашковский В.В., Федянин А.Л., Каранкевич А.Г.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В данной статье будет рассмотрено влияние изменения температуры на выходные параметры датчиков тока. Данные датчики тока будут применяться в системе мониторинга параметров двигателя.

Для получения необходимых данных была применена методика, которую можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рис. 1.

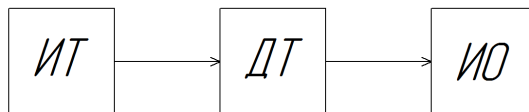


Рис. 1. Блок-схема испытательной установки

Данная испытательная установка содержит следующие элементы:

ИТ – источник тока регулируемый позволяет получать значения тока в пределах от 0 до 25 А.

ДТ – датчик тока (на номинальный ток 10А), представленный в виде трансформатора тока. ИО – измерительный орган представляет собой 2 устройства:

1. Устройство для мониторинга двигателя УМЗ (погрешность не более 5%) [1], позволяющее отслеживать значение тока измеряемого датчиком тока.
2. Мультиметр MS8265 (точность  $\pm(0,5\%)$ ) [2], для измерения напряжения на выходе датчика.

### Датчик тока на основе трансформатора тока.

Исследуемый датчик тока представляет собой трансформатор тока, намотанный из ленты электротехнической стали толщиной 0,1 мм и марки 3406(3409).

Трансформатор тока (ТТ) представляет собой аппарат предназначенный для преобразования первичного тока в величину, удобную для измерения [3]. Простейший трансформатор тока имеет вид, представленный на рис. 2.

Трансформаторы тока для измерений предназначаются для передачи информации измерительным приборам. Ко вторичной обмотке ТТ для измерений подключаются амперметры, токовые обмотки ваттметров, счетчиков и аналогичных приборов. Таким образом, трансформатор тока для измерений обеспечивает:



1. преобразование переменного тока любого значения в переменный ток, приемлемый для непосредственного измерения с помощью стандартных измерительных приборов;
2. изолирование измерительных приборов, к которым имеет доступ обслуживающий персонал, от цепи высокого напряжения [4].

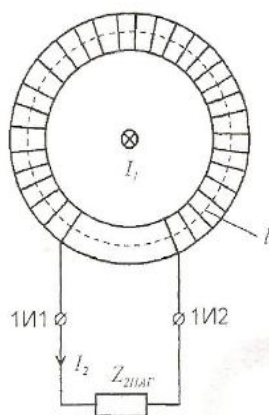


Рис. 2. Простейший трансформатор тока

### Проведение испытаний.

Суть исследования состояла в том что бы снять характеристики датчика тока при температуре  $-40, +20, +60^{\circ}\text{C}$ , в диапазоне токов от 0 до 100А.

Для имитации протекания большого тока первичная обмотка датчика тока была доработана следующим образом: в данной модификации число витков первичной обмотки было изменено с одного до семи (рис. 3). Для имитации возможных эксплуатационных условий была использована температурная камера. Температурная камера позволяет изменять температуру в диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

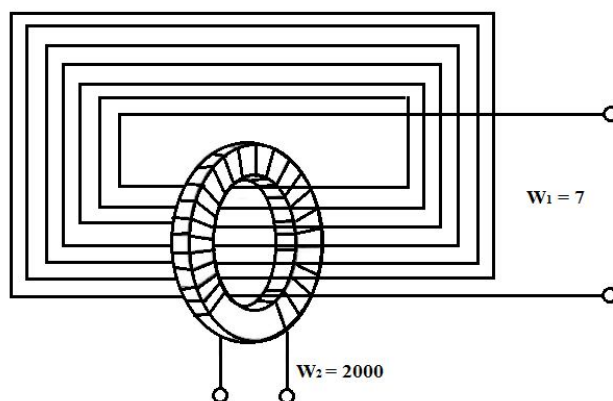


Рис. 3. Модифицированный датчик тока

В ходе проведения испытаний были построены следующие зависимости:

- зависимость выходного напряжения датчика от тока первичной обмотки ( $U_{\text{д}}(I_1)$ ) рис.4;
- зависимость измеренного тока от тока первичной обмотки датчика ( $I_{\text{изм}}(I_1)$ ) рис. 5;
- зависимость измеренного тока от отклонения тока ( $I_{\text{изм}}(\Delta)$ ) рис.6.

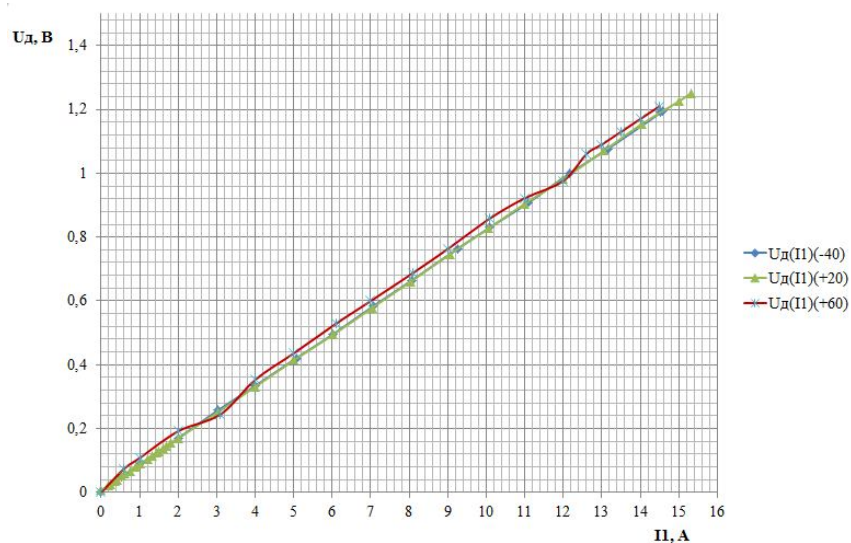


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения датчика от тока первичной обмотки

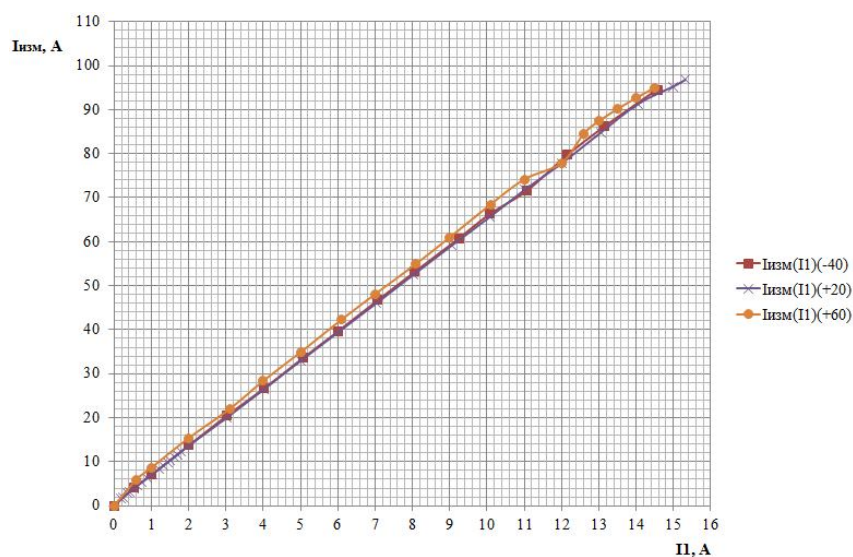


Рис. 5. Зависимость измеренного тока от тока первичной обмотки датчика

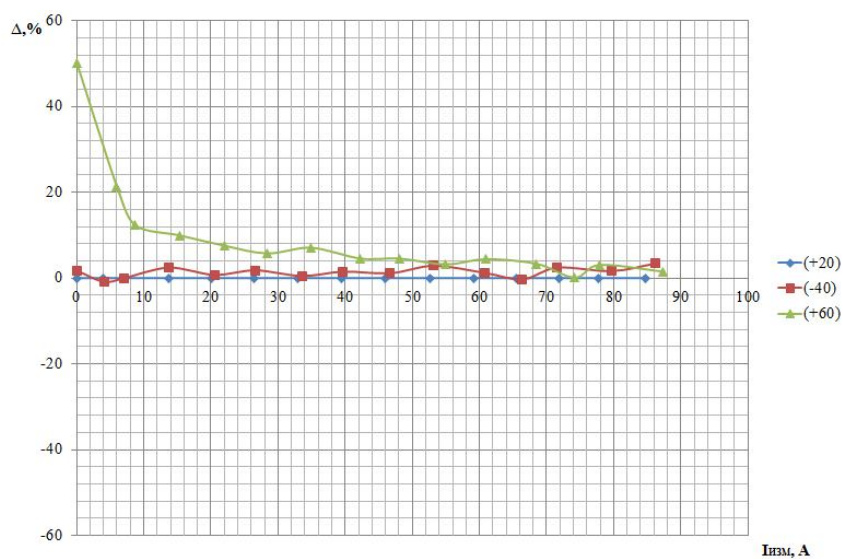


Рис. 6. Температурная зависимость измеренного тока от отклонения тока

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что:

- при температуре +60°C на малых токах наблюдается большое отклонение тока, это обусловлено нелинейностью датчика;
- при температуре – 40°C существенных отклонений не наблюдается.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство мониторинга и защиты УМЗ., Паспорт – Томск 2013.
2. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://mastech.ru/catalog/mult/ms8265.html>, свободный.
3. М.Бачурин Н.И. Трансформаторы тока. Расчеты и конструкции. М-Л.: Энергия, 1964. - 376 с.
4. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М., и др. Трансформаторы тока / - 2-е изд., перераб. И доп. – Л.: Энергоатомизат. Ленинград. Отд-ние, 1989. – 416с.:ил.

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Мирзаянов Р.Р., Вавилов В.Е., Габдрахманова А. А.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Важной задачей при проектировании электромеханических преобразователей энергии в целом, и синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в частности является автоматизация процесса проектирования, что позволит в максимально короткие сроки рассмотреть множество проектных вариантов и выбрать из них оптимальный [1, 2].

В данной работе авторами рассматривается разработка автоматизированного алгоритма проектирования СДПМ. При этом при проектных расчетах считаются заданными частота вращения ротора, максимальная линейная скорость, номинальное напряжение и мощность СДПМ,  $\cos\varphi$ , а также свойства постоянных магнитов (остаточная индукция  $B_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$ ). Также считаются заданными способ системы охлаждения СДПМ, режим работы при определенной температуре окружающей среды.

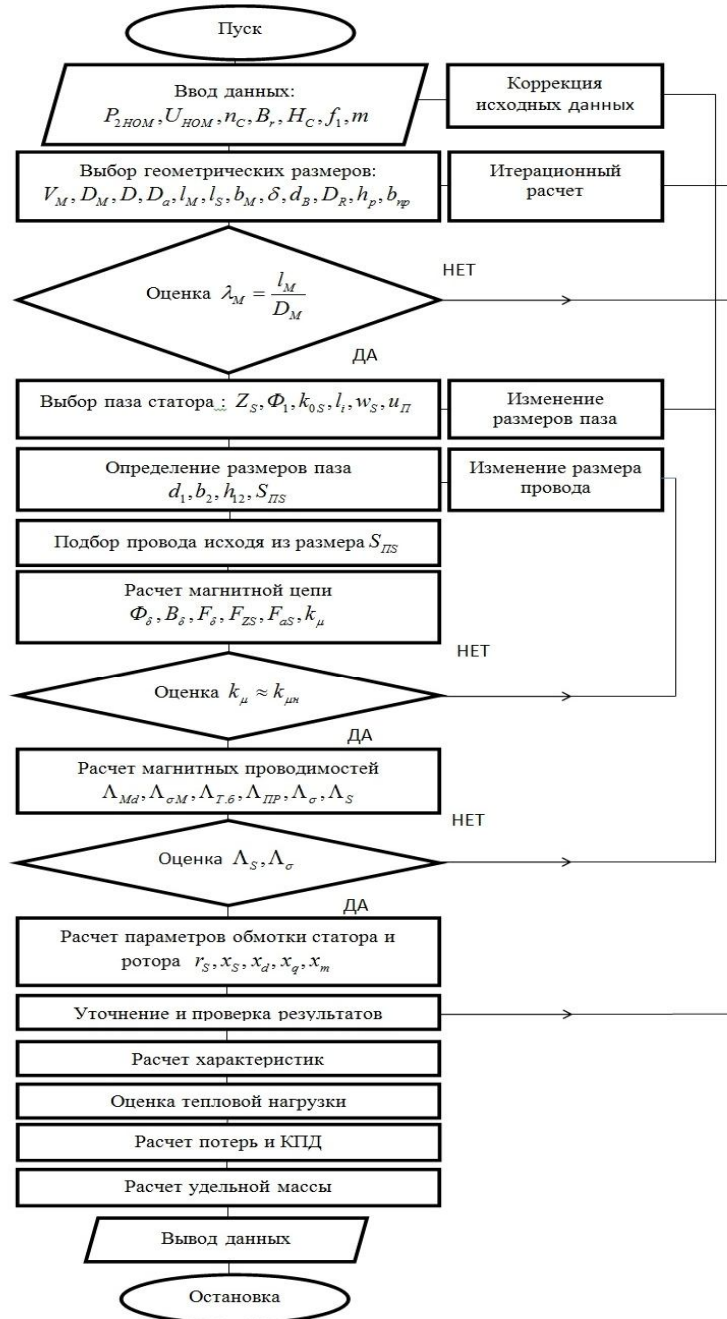
Задачей проектного расчета является определение основных геометрических размеров СДПМ, электромагнитных и тепловых нагрузок, а также его массовых характеристик. Исходя из исходных данных, определяются основные размеры СДПМ [3]:

$$V_M = 0,2 \frac{k_\phi k_{ad} (1 + \varepsilon)}{\xi f_1 B_r H_c},$$

где  $V_M$  - объем постоянных магнитов;  $\varepsilon$  - степень возбужденности двигателя;  $\xi$  - коэффициент использования постоянных магнитов;  $f_1$  - частота сети;  $B_r$  - остаточная индукция в магните;  $H_c$  - коэрцитивная сила в магните.

$$D_M = 1,083 \sqrt{\frac{V_M}{k_{3.M} \lambda_M}},$$

где  $D_M$  - диаметр магнита;  $k_{3.M}$  - коэффициент заполнения магнитом;  $\lambda_M$  - отношение длины магнита к его диаметру.



**Рис. 1.** Схема алгоритма СДПМ.  $Z_s$  - число пазов статора;  $\Phi_1$  - магнитный поток на полюс;  $k_{0s}$  - обмоточный коэффициент обмотки якоря;  $l_i$  - расчетная длина;  $w_s$  - число витков обмотки статора на фазу;  $u_{II}$  - число проводников в пазу;  $d_1, b_2, h_{12}$  - размеры паза;  $S_{ПС}$  - площадь паза;  $\Phi_\delta$  - магнитный поток в воздушном зазоре;  $B_\delta$  - индукция в воздушном зазоре;  $F_\delta, F_{ZS}, F_{as}$  - магнитные напряжения воздушного зазора, зубцов статора, ярма статора соответственно;  $k_\mu$  - коэффициент насыщения;  $k_{\mu n}$  - коэффициент насыщения при номинальном магнитном потоке;  $\Lambda_{M\delta}, \Lambda_{\sigma M}, \Lambda_{T.\delta}, \Lambda_{ПР}, \Lambda_\sigma, \Lambda_S$  - магнитные проводимости магнита на один полюс, рассеяния магнита, рассеяния с торцевых участков полюсных башмаков, межполюсной прорези, рассеяния роторного кольца, путей потока рассеяния обмотки якоря;  $r_s$  - активное сопротивление обмотки статора;  $x_s, x_d, x_q$  - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, реакции якоря по продольной оси и поперечной оси;  $x_m$  - эквивалентное индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре в асинхронном режиме

$$D_a = \frac{D}{k_D},$$

где  $D_a$  - внешний диаметр статора;  $D$  - внутренний диаметр статора;  $k_D$  - коэффициент отношения внутреннего диаметра статора к внешнему.

$$l_S \approx \frac{l_M}{(1,02 - 1,05)},$$

где  $l_S$  - длина пакета статора;  $l_M$  - длина магнита.

$$b_M \approx (0,94 - 1,1) D_M / p,$$

где  $b_M$  - ширина полюса магнита;  $p$  - число полюсов.

$$d_B \approx (0,2 - 0,25) D,$$

где  $d_B$  - диаметр вала.

$$D_R = D - 2\delta,$$

где  $D_R$  - диаметр ротора;  $\delta$  - воздушный зазор.

$$b_{np.э.} = 5 \cdot 10^{-6} \frac{l_M h_p h_M H_c}{\Lambda_\sigma S_M B_r},$$

где  $b_{np.э.}$  - ширина эквивалентной межполюсной прорези;  $h_p$  - высота полюсного башмака;  $\Lambda_\sigma$  - магнитная проводимость;  $S_M$  - площадь поперечного сечения магнита.

Разработанный на основе представленных выше математических соотношений алгоритм представлен на рисунке 1.

Разработанный алгоритм реализован в программном коде посредством математического пакета «Mathcad», при этом проведенные расчеты показали качественную сходимость с известными серийно выпускаемыми СДПМ.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании СДПМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – Москва: Энергия, 1980. – 495 с.
2. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. – Москва: Высшая школа, 1984. – 431 с.
3. Осин И.Л. Синхронные электрические двигатели малой мощности. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учебное пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Кормилин Ю.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

### Сфера применения

Автоматический выключатель служит для нечастых включений и отключений электрических цепей и защиты электроустановок от перегрузки и коротких замыканий, а также недопустимого снижения напряжения.

### Расчет токоведущего контура

В результате расчета токоведущего контура был произведен расчет размеров сечения шины по термической стойкости, номинальному току. Также произведен расчет площади сечения и размера гибкого соединения, контактного сопротивления коммутирующих контактов, расчет на термическую, динамическую стойкость.

### Выбор и расчет дугогасительного устройства

Дугогасительная решетка дает возможность значительно сократить длину дуги и гасить ее в ограниченном объеме при малых звуковом и световом эффекте. Возникающая при отключении электрической цепи между контактами дуга втягивается в решетку, за счет электро- и аэродинамических сил.

### Расчет электромагнитного расцепителя

Электромагнит устройство, создающее магнитное поле при прохождении электрического тока. Обычно электромагнит состоит из обмотки и ферромагнитного сердечника, который приобретает свойства магнита при прохождении по обмотке тока. В ходе работы была произведена разработка конструкции электромагнитного расцепителя таким образом, чтобы повысить надежность устройства и его технологичность. Чем технологичней устройство, тем дешевле, именно поэтому решение технологических проблем очень актуально.

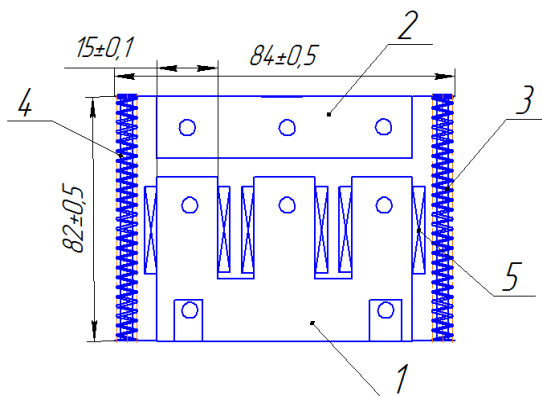


Рис. 1. Разработка эскиза электромагнитного расцепителя

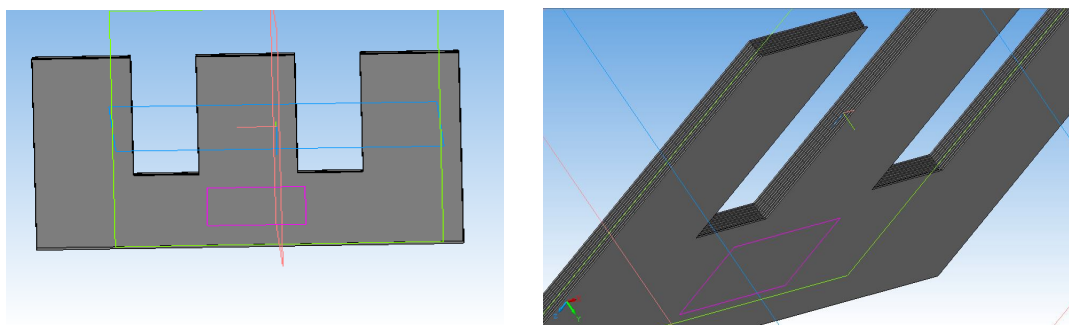


Рис. 2. Разработка эскиза электромагнитного расцепителя в программе компас 3d

### Расчет тяги механизма свободного расцепления

Для того, чтобы новый вид электромагнитного расцепителя работал, необходимы изменения в механизме свободного расцепления, которые заключаются в разработке конструкции тяги, которая взаимодействует с этим электромагнитным расцепителем.

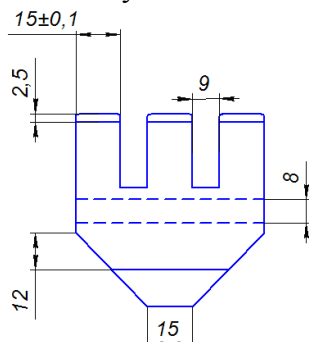


Рис. 3. Расчет тяги механизма свободного расцепления в программной среде компас 3d

### Технологический процесс производства

Ключевыми особенностями эффективности функционирования машиностроительного предприятия являются сжатые сроки и высокое качество технологической подготовки производства (ТПП). ТПП включает совокупность работ, обеспечивающих наиболее эффективное применение новых высокопроизводительных технологических процессов (ТП) с использованием современных достижений науки и техники, технологический контроль конструкторских чертежей, разработки процессов получения заготовок, их механической, термической и отделочной обработки, конструирование средств технологического оснащения, проверку и отладку ТП и конструкции спроектированной оснастки. Именно поэтому разработка технологического производства тяги механизма свободного расцепления ведется в программе Вертикаль V5.

Использование САПР ТП Вертикаль V5 позволяет:

- существенно сократить сроки и трудоемкость технологической подготовки производства;
- существенно повысить качество технологической документации;
- сократить число воспроизводимых технологических маршрутов и тем самым снизить издержки на материально-техническое обеспечение производства за счет оптимизации номенклатуры применяемых материалов, оснастки и режущих инструментов.

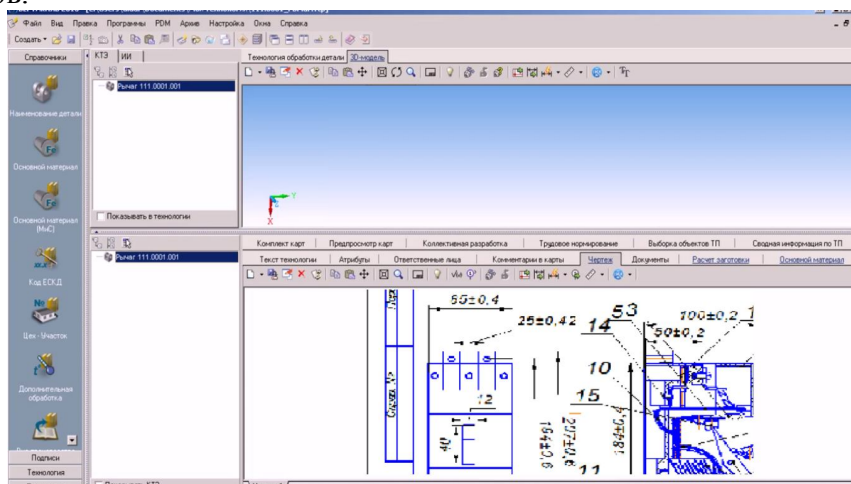


Рис. 4. Интерфейс программы вертикаль 5v

К тому же в этой же программе будет произведен расчет технологического процесса производства модернизированного автоматического выключателя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования). Учебное пособие для студентов электрических вузов. - М.: Энергия, 1971.
2. Таев И. С. Электрические аппараты управления: Учебник для вузов по спец. Электрические аппараты. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1984
3. Копылов Ю.В. «Расчёт магнитной цепи постоянного тока». Учебное пособие. Томск. Изд. ТПИ, 1985
4. Буль Б. К. Основы теории и расчёта магнитных цепей. М.-Л., издательство Энергия, 1964
5. Чунихин А. А. Электрические аппараты (общий курс). Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1975.
6. А.С.Каракулов Разработка алгоритмов управления для микропроцессорных электроприводов Лабораторный практикум Учебное пособие Издательство Томского политехнического университета Томск 2009

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КАБЕЛЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Насретдинова А.А., Анисимова О.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Глобальная роль солнечной энергетики неуклонно растет. Об этом свидетельствуют статистические данные, опубликованные Европейской ассоциацией фотоэлектрической промышленности. За 2012 год суммарная мощность действующих во всем мире гелиоэнергетических установок выросла на 31 гигаватт (ГВт), превысив рубеж в 100 ГВт. Сегодня они производят уже столько же электричества, что и 16 крупных угольных или атомных электростанций.

Мировой спрос на электроэнергию продолжает расти и, по данным CRU [2], к 2030 году по сравнению с 2004 годом ее производство может удвоиться (примерно от 15000 млрд кВт/ч до 30000 млрд кВт/ч).

Сейчас человечество начинает осознавать, что необходимы разработки новых возобновляемых источников энергии, не наносящих ущерба окружающей среде и обеспечивающих будущее развитие нашего мира.

Представляется целесообразным оценить, какие задачи с точки зрения использования возобновляемых источников энергии, в том числе нетрадиционных, возникают перед производителями кабелей. Из нетрадиционных источников электроэнергии большой интерес для кабельщиков представляют источники солнечной энергии.

Целью статьи является разработка рекомендаций по конструкции для кабелей, используемых в солнечных батареях.

В настоящее время на территории РФ не существует отдельного класса кабельных изделий для солнечных батарей. Используются кабели более или менее удовлетворяющим требованиям, что соответственно и ведет к снижению срока службы кабельного изделия.



Солнечные батареи генерируют напряжение постоянного тока, которое с помощью конверторов преобразуется в напряжение переменного тока. Сами солнечные батареи состоят из одиночных модулей, число которых может достигать нескольких тысяч. Все эти модули необходимо соединять между собой и обеспечивать вывод электроэнергии от солнечной батареи к инвертору. Основную массу кабелей, используемых непосредственно в солнечных батареях, составляют одножильные медные кабели сечением 4,0–6,0 мм<sup>2</sup>. Жилы кабелей гибкие, многопроволочные, луженые (класс 5 по стандарту МЭК 60228). Кабели имеют изоляцию и оболочку, легко отделяемые друг от друга для удобства монтажа.

Рабочее напряжение кабелей – до 1000 В (испытательное напряжение постоянного тока 1800 В). Диапазон рабочих температур кабелей от –40 до +90°С. По условиям эксплуатации кабели подвергаются длительному ультрафиолетовому облучению, а также различным погодным воздействиям. Немаловажное значение имеет химостойкость оболочки кабелей, так как поверхность кабелей солнечных батарей загрязняется и подлежит последующей мойке с помощью различных детергентов, которые могут воздействовать на оболочку кабелей. Кроме того, необходимо учитывать воздействие на кабели масел или других смазочных жидкостей, которые используются в модуле (модули поворачиваются, отслеживая изменение угла падения солнечных лучей, поэтому их подвижные части имеют смазку). Регламентированный срок службы кабелей – 25 лет.

Для выбора изоляционного материала для кабелей, используемых в солнечных батареях, были проведены испытания в области теплового старения и старения в агрессивной среде, существующих конструкций на соответствие выше сформулированным требованиям. Были выбраны кабели с изоляцией и оболочкой из поливинилхлорида (ПВХ), полиэтилена (ПЭ) и термоэластопласта (ТЭП).

Методика испытаний проводилась следующим образом:

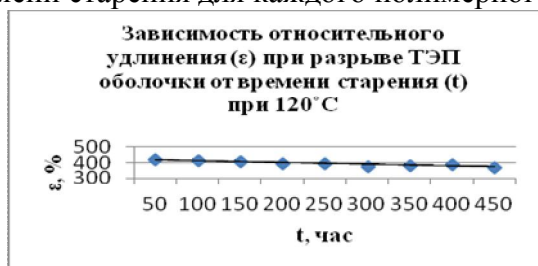
Тепловое старение в проводилось соответствии стандарту  
ГОСТ МЭК 60811-1-2-2011.

Испытания в агрессивных средах проводилось в соответствии стандарту ГОСТ МЭК 60811-1-1-2006.

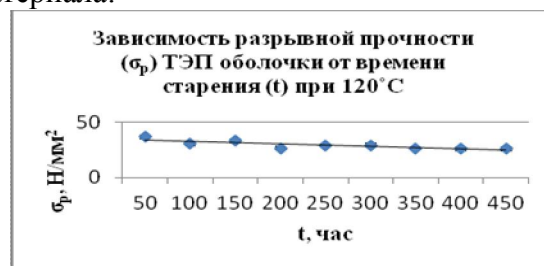
Данные образцы кабелей соответствуют существующим стандартам, прошли контрольные испытания и не являются дефектными.

Под действием повышенной температуры в материале происходят химические и физические изменения, которые приводят к постепенному изменению структуры и свойств материалов. Проведем оценку результатов исследования полимерных материалов в области теплового старения.

На рисунках 1-6 приведены результаты измерений в области теплового старения относительного удлинения при разрыве  $\epsilon_r$  и прочности на разрыв  $\sigma_r$  в зависимости от времени старения для каждого полимерного материала:



**Рис. 1.** Зависимость относительного удлинения ( $\epsilon$ ) от времени старения ( $t$ ) для оболочки кабеля ÖLFLEX 440P



**Рис. 2.** Зависимость разрывной прочности ( $\sigma_p$ ) от времени старения ( $t$ ) для оболочки кабеля ÖLFLEX 440P

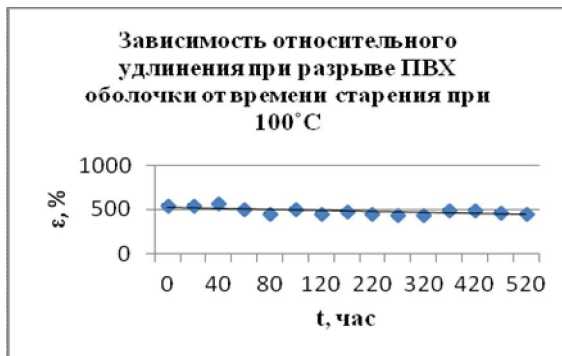


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения ( $\epsilon$ ) ПВХ оболочки от времени старения (t)

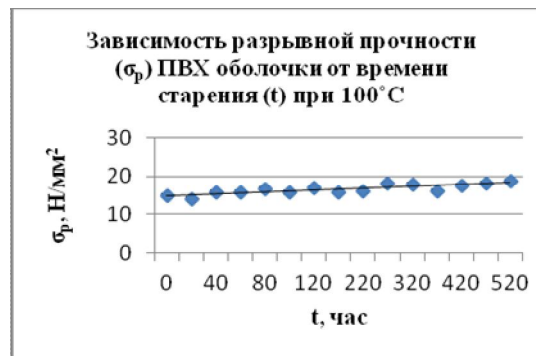


Рис. 4. Зависимость разрывной прочности ( $\sigma_p$ ) ПВХ оболочки от времени старения (t)

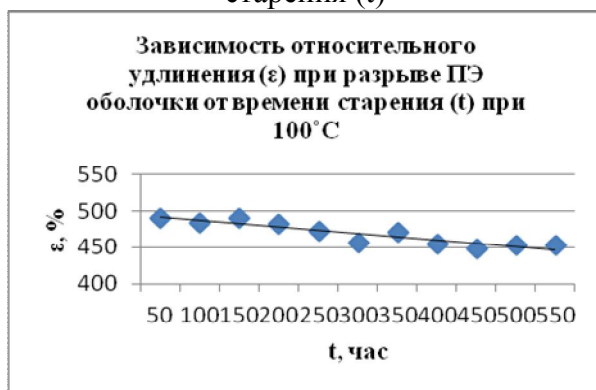


Рис. 5. Зависимость разрывной прочности ( $\sigma_p$ ) ПЭ оболочки от времени старения (t)

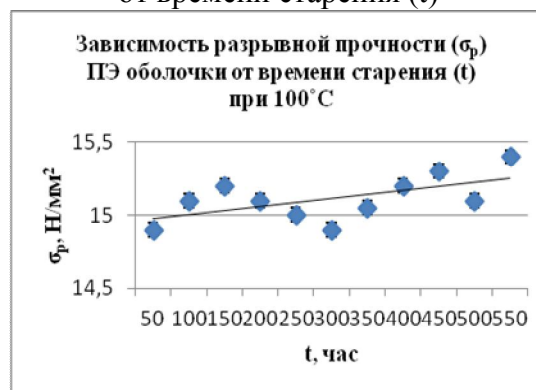


Рис. 6. Зависимость относительного удлинения ( $\epsilon$ ) ПЭ оболочки от времени старения (t)

Согласно полученным данным, относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_r$  гораздо ниже у ТЭП, по сравнению с ПЭ и ПВХ пластикатом, но предел прочности на разрыв  $\sigma_p$  у ТЭП, по сравнению с ПЭ и ПВХ пластикатом, является наиболее высоким. Таким образом, скорость протекания описанных процессов зависит от скорости изменения концентрации различных добавок: стабилизатора или пластификатора, а так же его распределения по объему оболочки кабеля и от степени усадка.

Стойкость полимерных материалов к воздействию агрессивных сред является основным свойством, определяющим целесообразность применения и срок службы кабельного изделия.

Ниже приведены результаты измерений относительного удлинения при разрыве  $\epsilon_r$  и прочности на разрыв  $\sigma_p$  в зависимости от времени старения для каждого полимерного материала (средние значения):

В среднем значение относительного удлинения  $\epsilon$  ТЭП оболочки составляет 381,6 %. Среднее значение разрывной прочности  $\sigma_p$  31,8 Н/мм<sup>2</sup>. В среднем значение относительного удлинения ПВХ оболочки составляет 126,2 %. Среднее значение разрывной прочности  $\sigma_p$  32,1 Н/мм<sup>2</sup>.

Марка испытуемого ПЭ не подвергалась старению в агрессивной среде, так является не стойкой в воздействию агрессивных сред.

Скорость протекания деструкционных процессов происходящих в полимере, зависит от способности полимера сопротивляться разрушительному воздействию температуры, агрессивной среды и воздействию механических сил. Факторы, участвующие в ухудшении свойств материала, так же определяются конструкционными

особенностями кабеля, надмолекулярной структурой полимера, технологическими режимами при изготовлении кабеля, влажностью и давлением окружающего воздуха.

Подводя итоги, можно констатировать, что по результатам проведенных механических испытаний для каждого полимерного материала максимальное сохранение механических характеристик (в сравнении с литературными данными значений до старения) в области теплового старения составило у ТЭП.

По результатам старения в агрессивной среде, максимальное сохранение механических характеристик составило также у ТЭП.

По результатам проделанной работы, рекомендуемая конструкция кабеля для солнечной батареи, исходя из механических характеристик, может быть следующей: токопроводящая жила – медная, изоляция и оболочка из термоэластопласта. Соответствие требованиям, предъявляемым к кабелям для солнечных батарей, а так же свойства полимерных материалов и их длительное сохранение, существенно влияют на срок службы кабельного изделия и целесообразность применения в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cables in Renewable Energy Systems (CRU). ICF News, Issue 61, Juli 2008. P. 3–11
2. Голицын М.В., Баженова О.Н., Пронина Н.В., Архипов А.Я., Макарова Е.Ю. Энергия: экономика, техника, экология. – М.: Наука, 2010. – 125
3. Моисеева В.Г. Термоэластопласты. / В.Г. Моисеева М., Химия 1985. -184с.
4. Энциклопедия полимеров. М.: «Советская энциклопедия» Т3, 1977.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ARDUINO ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

Геращенко С.В., Сидорчик Д.Е.

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

Микроконтроллеры нашли широкое применение в сфере создания различного рода роботов и манипуляторов. Среди доступных контроллеров мною был выбран микроконтроллер ATmega в связи с невысокой стоимостью и доступностью.

ARDUINO – [аппаратная](#) вычислительная платформа для разработки электронных устройств. Arduino позволяет связать виртуальный мир с физическим посредством различных датчиков и исполнительных механизмов. Программирование ведется на языке Си подобном языке, в основе которого лежит C++.

Исследование производилось на двух платформах: Arduino Uno (рис. 1, а) и Arduino Mega (рис. 1, б).

Была разработана часть проекта систему управления, которая выводит в числовом и в графическом виде данные полученные из датчика Акселерометра и гироскопа, он является единым датчиком.

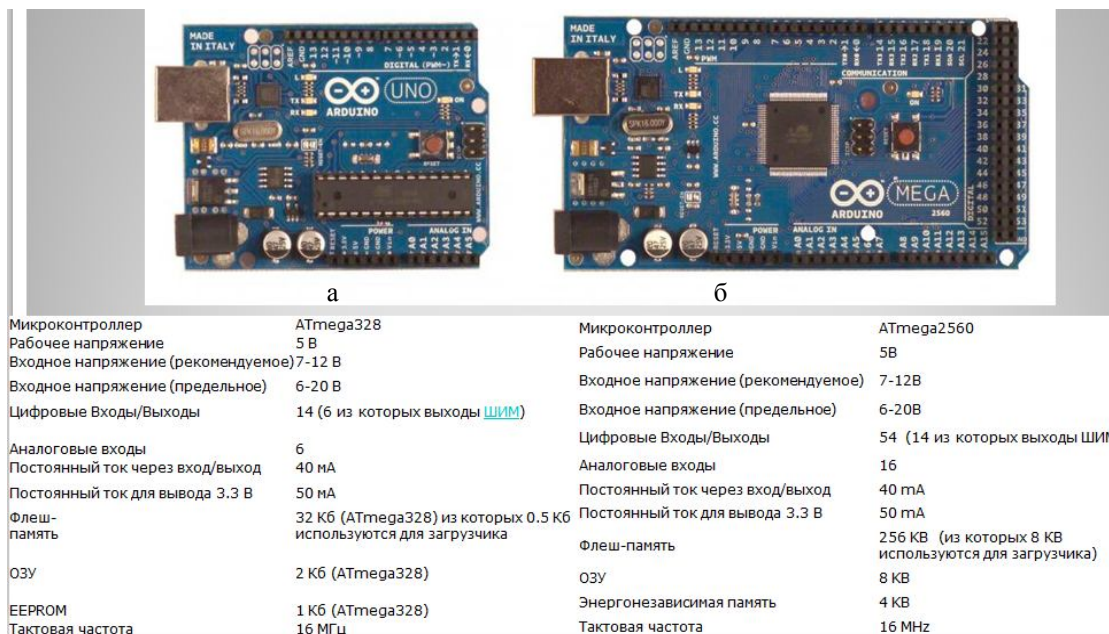


Рис. 1. Технические характеристики двух платформ Arduino

Среда обработки данных является Simulink (рис. 2), графическая среда моделирования Matlab.

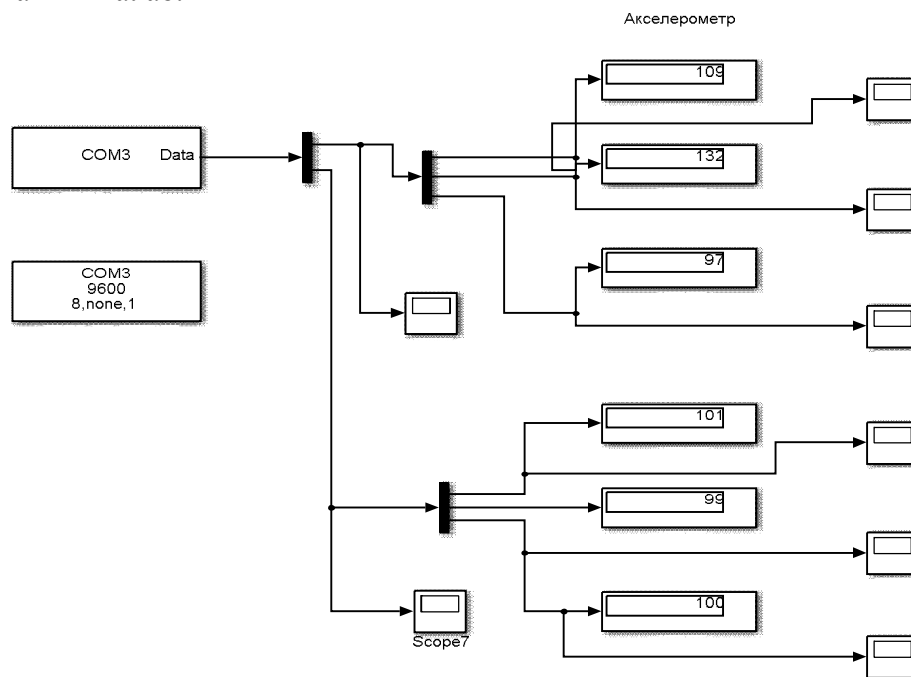
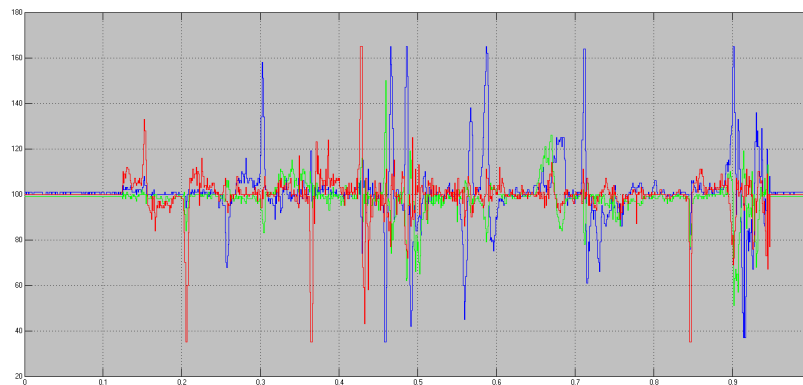
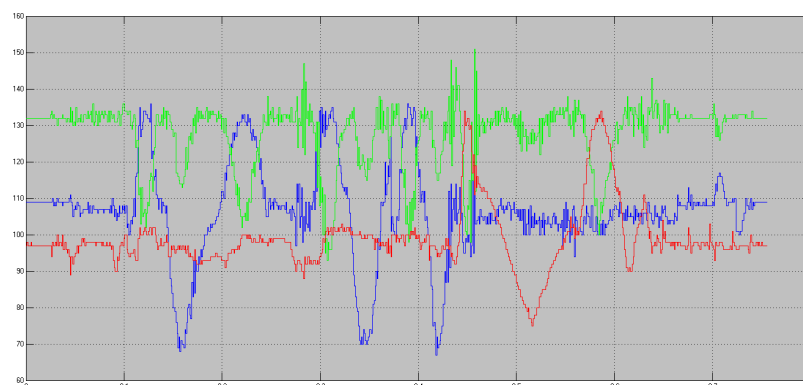


Рис. 2. Связь среды Simulink с Arduino и вывод получаемых данных из датчика акселерометра через COM порт

Были сняты данные из акселерометра (рис. 3) и из гироскопа (рис. 4). Данные представлены в графическом виде. Акселерометр показывает отклонения от каждой оси. Чтобы их использовать для системы управления, их необходимо отфильтровать методом сглаживания. Но это будет проводится уже на практической реализации какого-либо устройства. Гироскоп показывает угловое ускорение, о чем судят резкие экстремумы графиков.

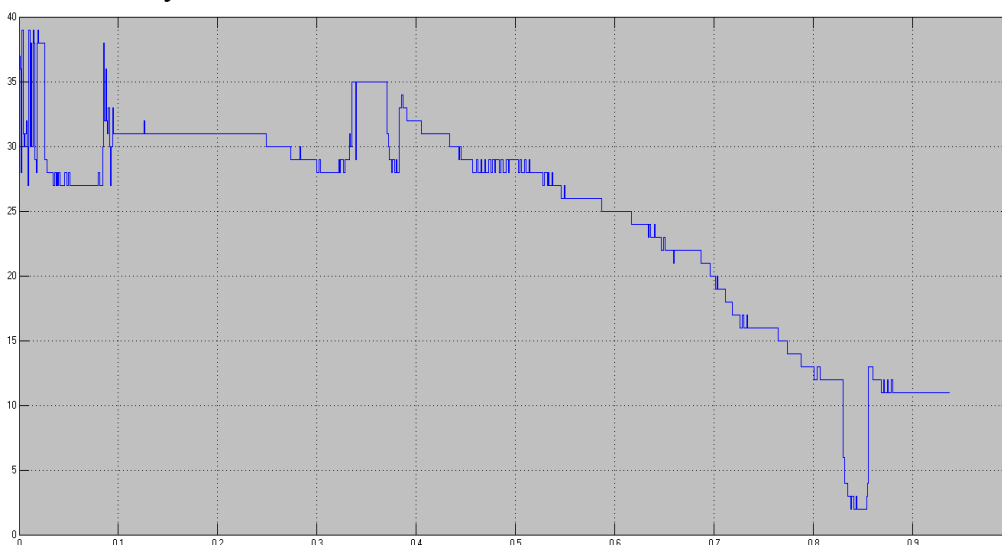


**Рис. 3.** Показания акселерометр



**Рис. 4.** Показания гироскоп

Так же был исследован ультразвуковой датчик расстояния, который показывает расстояние до объекта. На второй половине графика отчетливо видно как расстояние уменьшалось. Но я столкнулся с проблемой, когда данные приходили не корректно, что было вызвано опросом датчика, когда импульс не успевал проходить путь до конца, и датчик порой давал нулевое значение. Эта проблема решилась путем установки небольшого времени запаздывания опроса сигнала в виде 30 мл секунд. На этом графике (рис. 4) запаздывание 25 мл секунд, о чем судится небольшая погрешность в виде единичных ступенек.

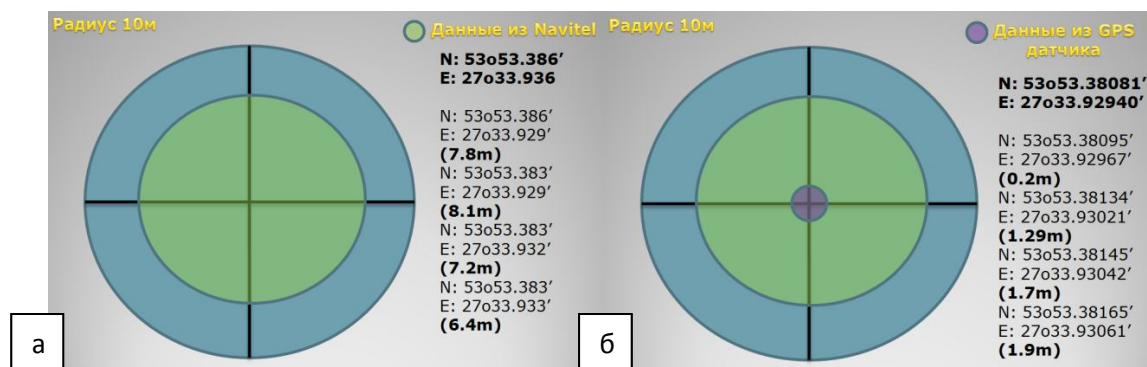


**Рис. 5.** Показания ультразвукового датчика расстояния

Для определения координат местонахождения был проведен ряд экспериментов 2-х устройств с глобальной системой позиционирования.

На рисунке 6 представлены данные глобальной системы позиционирования GPS, которая встраивается в промышленной серии мобильных телефонов, а также навигационное программное обеспечение NAVITEL. Здесь графически изображен диапазон отклонения данных 5 измерений относительно первого измерения. На рисунке видно, что погрешность может достигать до 8 метров. Графически он изображен зеленым кружком.

Расчет расстояния от одной координаты относительно другой был произведен с помощью одного из online калькулятора позиционирования.



а) Navitel,

б) GPS arduino

Рис. 6. Данные из глобальной системы позиционирования

На рис. 6б представлены данные уже с приобретенного GPS датчика, который был подключен к платформе Arduino. Этот датчик выдает более точные координаты, точнее 5 знаков долей минут, нежели промышленного датчика 3 знака долей минут. Его погрешность составляет до 2 метров, что существенно улучшает позиционирование. Графически он изображен сиреневым кружком. А зависимость двух датчиков из мобильного телефона и отдельного датчика тоже можно увидеть на рисунке 6б.

В целом платформа Arduino показала хорошие результаты в работе с разнотипным оборудованием.

## ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Торопов А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Для выполнения многих технических задач требуются датчики, погрешность измерения которых не превышает десятых долей процента в широком диапазоне рабочих температур при минимальных габаритах, высоком уровне выходного напряжения и помехозащищенности. Применение в таком случае фотооптических датчиков, индуктосинов, редуктосинов или цифраторов не оправдано ввиду их сложности, больших габаритов, массы и стоимости. Перспективным направлением решения таких задач является создание индукционных датчиков по инвариантной схеме. Датчик предназначен для преобразования угла поворота ротора в сигналы переменного тока, величины напряжений которых пропорциональны углу поворота ротора.

Конструктивная схема датчика показана на рисунке 1. Датчик состоит из следующих основных сборочных единиц: обмотки возбуждения, магнитопровода, экрана, вала и рабочих обмоток.

Датчик содержит статор, состоящий из шихтованного магнитопровода 2 в виде трех колец, соединенных переключками и размещенных на среднем кольце сосредоточенных обмоток возбуждения 1, включенных встречно, и рабочих обмоток 5, включенных согласно, а также ротор в виде экрана 3 (короткозамкнутого витка), закрепленного на полом вала 4.

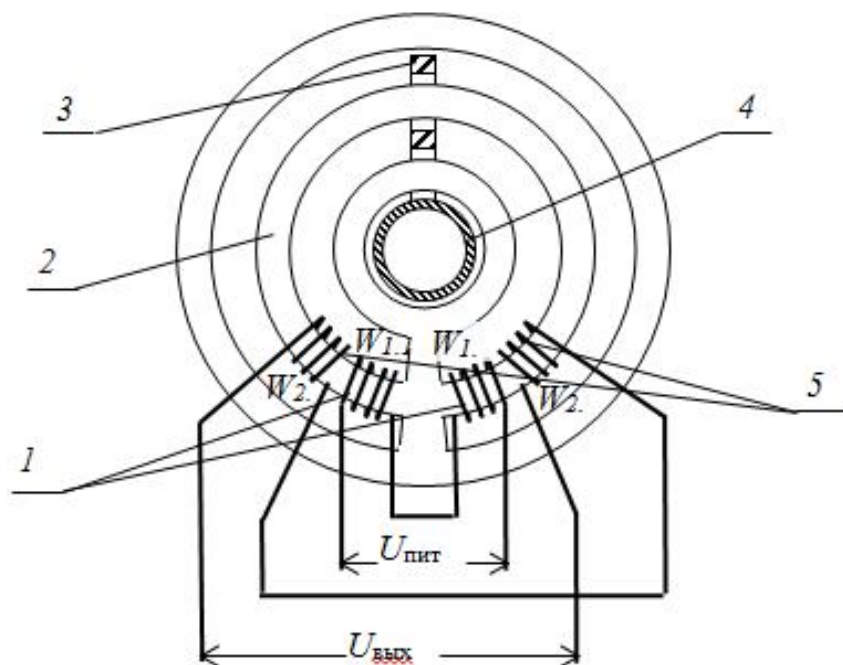
Проходная конструкция датчика (отсутствие подшипников) обеспечивает его высокую технологичность и позволяет разместить его непосредственно на валу привода.

Являясь развитием конструкции бесконтактного датчика углового перемещения с короткозамкнутым витком, данный датчик отличается сосредоточенными обмотками вторичной цепи вместо распределенных [3].

По принципу действия датчик является индукционно-динамическим трансформаторного типа. Принцип работы основан на электромагнитном экранировании.

При подаче напряжения питания на обмотки возбуждения  $W_1$  и  $W_2$ , которые включены последовательно-встречно, магнитное поле в зазорах между кольцами магнитопровода, создаваемое током, протекающим по обмоткам, равномерное, поскольку равномерны зазоры.

При среднем положении экрана относительно физической нейтрали датчика потокосцепления рабочих обмоток, которые включены последовательно-согласно, равны и создают равные, но противоположно направленные ЭДС. Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  при этом равно или близко к нулю.



**Рис. 1.** Конструктивная схема датчика:  
1 – обмотки возбуждения; 2 – магнитопровод;  
3 – экран; 4 – вал; 5 – рабочие обмотки

При перемещении экрана из среднего положения на угол  $\alpha$  поток, создаваемый экраном, изменяет потокосцепление рабочих обмоток, одной – увеличивает, другой – уменьшает, следовательно, изменяется выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Оно увеличивается пропорционально увеличению угла поворота экрана.

Выходной характеристикой является отношение разности напряжений выходных полуобмоток  $U_{21}$  и  $U_{22}$  к напряжению дополнительной выходной обмотки или к сигналу, эквивалентному  $U_0$ , за который может быть принята сумма  $U_{21}+U_{22}$ :

$$Y = \frac{U_{21} - U_{22}}{U_{21} + U_{22}}$$

Полная компенсация погрешностей от температуры и колебания напряжения у датчиков собранных по инвариантной схеме с опорной обмоткой возможна при равенстве активных сопротивлений опорной и выходной обмоток [1].

В этом случае нелинейность выходной характеристики датчика, определяется по формуле:

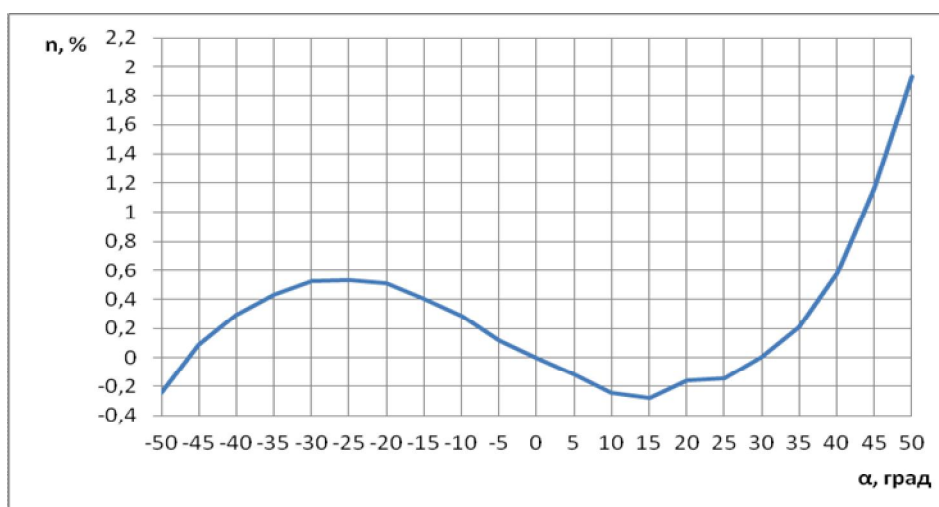
$$n = \frac{(Y_i/k_{cp}) - \alpha_i}{\alpha_{\max}} \cdot 100\%$$

где  $\alpha_i$  – угол поворота вала в текущей точке измерения, град.

$k_{cp}$  – средняя крутизна выходной характеристики датчика, 1/град.

$\alpha_{\max}$  – максимальный угол поворота вала, град.

$$k_{cp} = \frac{\sum Y_i}{\sum \alpha_i}$$



**Рис. 2.** Зависимость нелинейности от угла поворота ротора по инвариантной схеме

Полученные рабочие характеристики представленного датчика показывают, как изменяется выходное напряжение рабочей обмотки относительно угла поворота ротора датчика. Рабочие характеристики имеют линейный характер, что соответствует высокой точности датчика.

Нелинейность выходной характеристики датчика (рисунок 2) обуславливается величиной и равномерностью рабочего воздушного зазора между статором и ротором при изготовлении датчика. Причиной неравномерностей могут быть различные факторы при изготовлении, такие как: несоосность конструкции датчика, отклонения от размеров, недостаточно равномерная шлифовка пакета роторов. Следует отметить, что нелинейность не выходит за пределы допустимых значений.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики: пер. с англ. / Джексон Р.Г. – М.: Техносфера, 2007. – 380 с.
2. Шидлович Л.Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение. – М.: Энергия, 1966.
3. Гладущенко В.Н., Балюс И.В. Электронные и электромеханические системы и устройства // Сборник научных трудов НПП «Полус». –Томск: 1997. – С. 161-164.

## РАЗРАБОТКА СИЛОВОГО КАБЕЛЯ СПЭ С НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ БАРЬЕРОМ

Догоновский В.Д.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Современные силовые кабельные линии среднего напряжения выполняются на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). В тоже время всеобщие тенденции повышения энергоэффективности в энергетике диктуют условия необходимости улучшения эксплуатационных характеристик существующих и вновь сооружаемых кабельных линий.

Улучшение эксплуатационных характеристик СПЭ кабелей возможно обеспечить путем снижения температуры на поверхности кабеля.

Повышенные токовые нагрузки силовых СПЭ кабелей среднего напряжения по сравнению с кабелями с бумажно-пропитанной изоляцией обеспечиваются за счет максимально допустимой температуры нагрева токопроводящей жилы 90 °С. Но ввиду малой толщины изоляции (кабели среднего напряжения 2.8 - 3 мм) и, как следствие, относительно небольшого теплового сопротивления кабеля он разогревается на поверхности до температур 70 - 85 °С. Избыточные температуры оказывают негативное влияние на условия прокладки (высыхание грунта, повышение температуры воздуха и т.д.) и сопутствующие кабельные системы.

Для снижения пагубного влияния теплового поля кабеля предложено изменить конструкцию силового кабеля путем замены полупроводящего слоя по изоляции на «термический барьер» той же толщины (0.6 мм) выполненный на основе наноразмерного пирогенного диоксида кремния.

Для подтверждения возможности и целесообразности использования «термического барьера» выполнен тепловой расчет двух конструкций кабелей одинаковых геометрических размеров с «термическим барьером» и без него с последующим определением температуры на поверхности кабеля. На основе полученных результатов путем вариации коэффициента теплопроводности «термического барьера» доказано, что с введением в конструкцию барьера из наноразмерных частиц SiO<sub>2</sub> температура на поверхности кабеля снижается с 83 до 54 °С без изменения максимально допустимой токовой нагрузки, определенной с учетом взаимного теплового влияния фаз друг на друга. Так же определено пороговое значение коэффициента теплопроводности для заданных геометрических размеров равное  $4.8 \cdot 10^{-3}$  [Вт/(м·К)], при котором наблюдается максимальное снижение температуры на поверхности кабеля (30%).

## **АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРОЛЛЕЙБУСОВ**

Черепенников О.В., Муравлев О.П.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

На сегодняшний день доля перевозок пассажиров общественным транспортом повышенной пассажироместимости в России составляет 60%, что предопределяет повышенные требования к надёжности. Проблема надежности технических систем значительно обострилась, что вызвано их усложнением, ужесточением условий эксплуатации, увеличением числа возлагаемых на системы функций и их ответственности, повышением требований к точности и качеству выпускаемой продукции. [1]

В настоящее время на городском транспорте широкое применение находит троллейбус, обладающий рядом преимуществ по сравнению с автобусом и трамваем, но, не смотря на преимущества, при эксплуатации, троллейбус имеет ряд проблем. Одной из самых важных и актуальных в настоящее время является проблема обеспечения надежности функционирования электротехнического оборудования (ЭО). В процессе эксплуатации под воздействием внешних факторов и специфических режимов работы техническое состояние оборудования непрерывно ухудшается, снижаются показатели надежности, и увеличивается количество отказов. Проблема обеспечения надежности электрооборудования троллейбусов может быть успешно разрешена лишь при комплексном рассмотрении ряда сложных задач на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации. При решении этих задач практическому инженеру необходим определенный объем сведений о прикладной теории надежности, статистической обработке информации, общих методах расчета надежности изделий и систем, об условиях эксплуатации и режимах работы электрооборудования, физических закономерностях старения и износа их сборочных единиц, о результатах оценки надежности, включая анализ видов и причин отказов, технологических мер по повышению надежности.[2]

Целью статьи является оценка эксплуатационной надежности тяговых асинхронных двигателей ДТА 1-У1.

Важным этапом для рассмотрения эксплуатационной надежности тяговых асинхронных двигателей является сбор статистических данных. Были проанализированы данные по неисправностям тяговых электродвигателей ДТА 1У1 троллейбусов марки АКСМ 321. Информация получена при прохождении научно-исследовательской практики в Томском трамвайно-троллейбусном управлении.

Надежность тягового двигателя трамвая определяется исправным состоянием его отдельных элементов. Анализ эксплуатационных данных позволил определить наиболее подверженных отказам элементы тяговых электродвигателей. Использовались данные по отказам тяговых асинхронных двигателей троллейбусов в период с 2012 по 2013 года. Суммарное количество отказов тягового двигателя за данный период равняется 46. Анализ отказов тяговых двигателей за данный период показал, что наиболее подвержены отказам элементом являются шариковые подшипники, доля их отказов составляет 66% от общего количества выходов из строя тягового двигателя. Неисправности обмотки статора и неисправности ротора 19% и 15% соответственно. Ввиду того, что шариковые подшипники наиболее подвержены отказам, рассмотрим причины отказов этих элементов. Основными причинами отказов этих элементов являются проникновение влаги, ошибки при монтаже, низкое качество смазки.

Для оценки эксплуатационной надежности используют математическую модель. Для моделирования надежности тягового электродвигателя необходимо задать входные параметры, выходные параметры и задать ограничения. Входными и выходными параметрами выступают различные показатели и критерии. В качестве входных параметров приняты абсолютная частота отказов  $n(\Delta s_i)$  - количество наработок на отказ ( $n$ ) отнесенное к интервалу, границы интервалов  $\Delta s_i$  км, количество интервалов  $m$ . В качестве границ интервалов взяты пробеги трамвая, а не временные промежутки. Выходными параметрами для математической модели эксплуатационной надежности являются вероятность безотказной работы  $P(s)$ , интенсивность отказов  $\lambda$ . В качестве ограничений в данной модели и для оценки степени совпадения эмпирической и теоретической кривых распределения применяются критерии согласия. В качестве ограничения принят критерий Пирсона.

Таким образом математическая модель эксплуатационной надежности троллейбуса включает:

- входные параметры (абсолютная частота отказов  $n(\Delta s_i)$  - количество наработок на отказ ( $n$ ) отнесенное к интервалу, границы интервалов  $\Delta s_i$  км, количество интервалов  $m$ );
- выходные параметры (вероятность безотказной работы  $P(s)$ , интенсивность отказов  $\lambda$ );
- ограничения (критерий Пирсона).

Используя данную математическую модель, проведем анализ тягового двигателя.

С точки зрения надежности асинхронный двигатель представляет собой систему, все элементы которого соединены логической последовательностью и имеют резервирование.

Поэтому под надежностью системы понимается результирующая надежность при заданной структуре и известных значениях надежности всех входящих в нее блоков и элементов. Разбиение системы на блоки осуществляется на базе единства функционирования изделия и происходящих в нем физических процессов. При этом пользуются методом так называемых «слабых звеньев», сущность которого состоит в следующем: при исследовании рассматриваются те элементы системы, надежность которых в данных условиях минимальна. Сама модель «слабейшего звена» представляет собой систему с последовательным соединением элементов, в котором при отказе одного элемента выходит из строя вся цепь. Так, в асинхронном двигателе таким элементом является подшипниковый узел, обмотка статора и ротор.

При последовательном соединении результирующая надежность определяется как произведение значений надежности для отдельных ее блоков [4].

$$P = \prod_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

где  $P_i$  – вероятность безотказной работы  $i$  – го узла;

$N$  – число последовательно соединенных узлов.

На рис.1 изображен исследуемый тяговый двигатель троллейбуса АКСМ-321 в виде структурной схемы последовательно соединенных узлов.

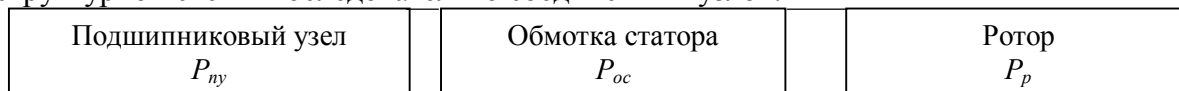


Рис. 1. Структурная схема тягового электродвигателя

Используя формулу 1, получим результирующую вероятность безотказной работы всего ТЭД

$$P_{ТЭД} = P_{пу} + P_{ос} + P_p \quad (2)$$

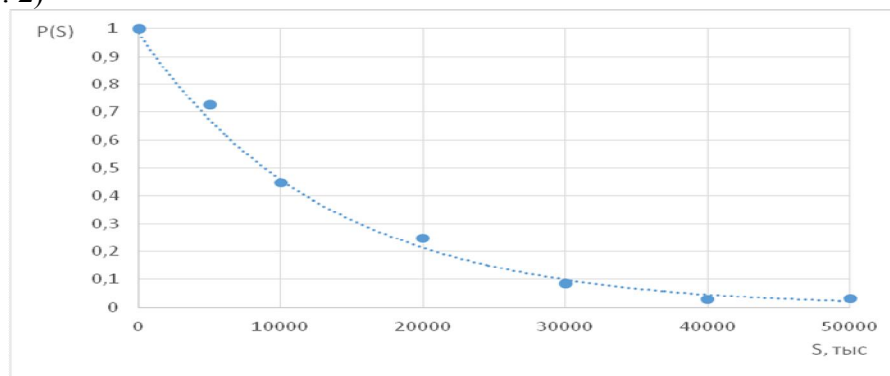
где  $P_{пу}$ ,  $P_{ос}$ ,  $P_p$  – вероятности безотказной работы (ВБР) подшипникового узла, обмотки статора и ротора соответственно.

Рассмотрим ВБР на всех интервалах времени, для этого необходимо составить таблицу. В таблице 1 приведены данные для расчета ВБР тягового электродвигателя.

**Таблица 1.** Расчет ВБР тягового электродвигателя в целом

$S$	0	5000	10000	20000	30000	40000	50000
$P_{пу}$	1	0,95	0,729167	0,583333	0,270833	0,145833	0,104167
$P_{ос}$	1	0,833333	0,75	0,583333	0,5	0,416667	0,5
$P_p$	1	0,909091	0,818182	0,727273	0,636364	0,454545	0,636364
$P_{тэд}$	1	0,72601	0,447443	0,247475	0,086174	0,02762	0,033144
$Q$	0	0,27399	0,552557	0,752525	0,913826	0,97238	0,966856

Аналогично проводим расчет для остальных значений пробега и заносим результаты в табл. 1, По полученным данным построим кривую ВБР тягового электродвигателя в целом (рис. 2)



**Рис. 2.** Кривая вероятности безотказной работы ТЭД

Из кривой вероятности безотказной работы видно, что уже при км ВБР двигателя крайне мала. Это объясняется тем, что основное количество отказов подшипников происходит после 10000 км пробега, что составляет приблизительно 60 рабочих дней.

Проведенные исследования показывают, что надежность ТЭД определяется условиями эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бачурин Н.С. Методика оценки показателей надежности трамвайного вагона/Научно-технический журнал "Транспорт Урала".-№1(20).-2009.-93 с. Режим доступа: [<http://vagons.tramvaj.ru/>].
2. Костенко Н.А. Прогнозирование надежности транспортных машин// -Машиностроение.- 1989.- 240 с.
3. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния.- Иваново:Иван.гос. энерг. ун-т, 2002.- 168с.
4. Котельнец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник.- М.: Академия, 2003.- 342 с.

## ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКЕ ДОБАВОЧНОГО ТОКА КОММУТАЦИИ

Кулибаба М.В. Феоктистов К.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Тяжелые условия эксплуатации локомотивов предъявляют высокие требования к техническому состоянию отдельных узлов и агрегатов. Особое место в них занимают тяговые электродвигатели (ТЭД), которые являются наиболее нагруженными и, одновременно, наиболее уязвимыми и неконтролируемыми узлами.

На долю ТЭД приходится свыше 50% возникающих неисправностей, из-за которых отрасль терпит убытки, связанные с внеплановыми ремонтами, простоями, исчисляемыми десятками часов, а также с аварийными ситуациями, нарушающими безопасность движения.

Одним из основных узлов тяговых электрических машин является коллекторно-щеточный узел (КЩУ). Большая часть неисправностей ТЭД связана с обмотками и проявляется в нарушении процесса коммутации. Увеличение искрения вызывается также многими причинами механического характера. Проявление нарушений коммутации в искрении коллекторно-щеточного узла давно рассматривается как показатель состояния машины постоянного тока и, в частности, ТЭД.

Целью наблюдения за искрением коллекторно-щеточных узлов ТЭД заключается в контроле качества коммутации тяговых электродвигателей при работе на электровозе, что позволяет: исследовать состояние ТЭД в разных режимах эксплуатации, предупреждать о появлении неисправности для своевременного принятия решения и сохранения работоспособности ТЭД.

Основной целью нашей исследовательской работы является создание системы контроля добавочного тока коммутации ТЭД во время эксплуатации в электровозах в следствии программной обработки информации и оценки искрения коллекторно-щеточного узла.

Для решения задач диагностики рассматривается применение устройство контроля искрения (УКИ) [3]. УКИ позволяет напрямую определить величину искрения в баллах, характер коммутации [4], частоту вращения двигателя после обработки сигнала [5]. Спектральный анализ сигнала даст возможность выявить электрические и механические дефекты двигателя, а так же позволит настроить магнитную систему двигателя. На рис.1 приведена спектрограмма сигнала УКИ, по оси y амплитуда в вольтах, по оси x частота в десятках Гц.

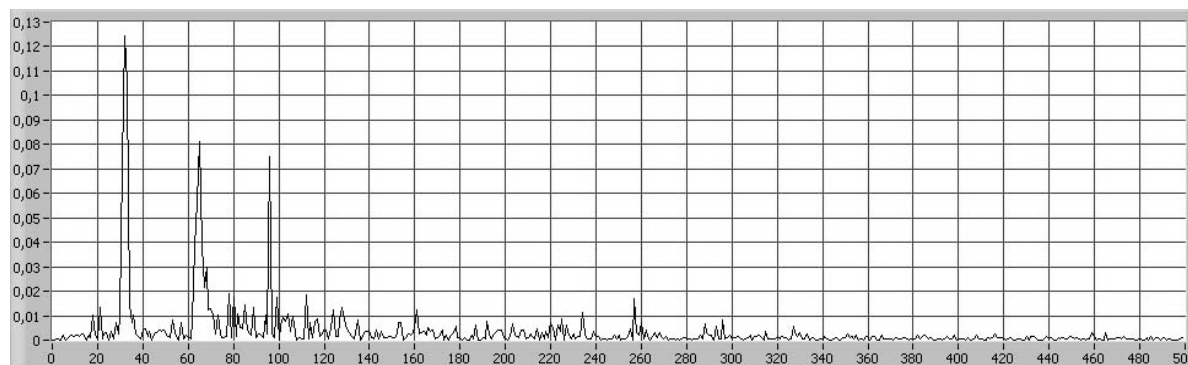


Рис. 1.

Алгоритм обработки сигнала показан на рис.2. Сигнал с УКИ подается на АЦП, в оцифрованном виде поступает в ПК. Программа, созданная в среде графического программирования LabView, выполняет необходимые вычисления и преобразования: фильтрацию сигнала от высокочастотных помех, вычисление бальности искрения по среднеквадратичному значению сигнала УКИ и характера коммутации, разложение в ряд Фурье для диагностики ТЭД и вычисления частоты вращения якоря. Результаты вычислений отображаются на экране монитора посредством экранных приборов.

На основании обработки сигнала УКИ, произведенного с помощью специального программного обеспечения, выводится информация о бальности искрения, характере коммутации, величинах магнитных зазоров под дополнительными полюсами ДПТ в относительных единицах.

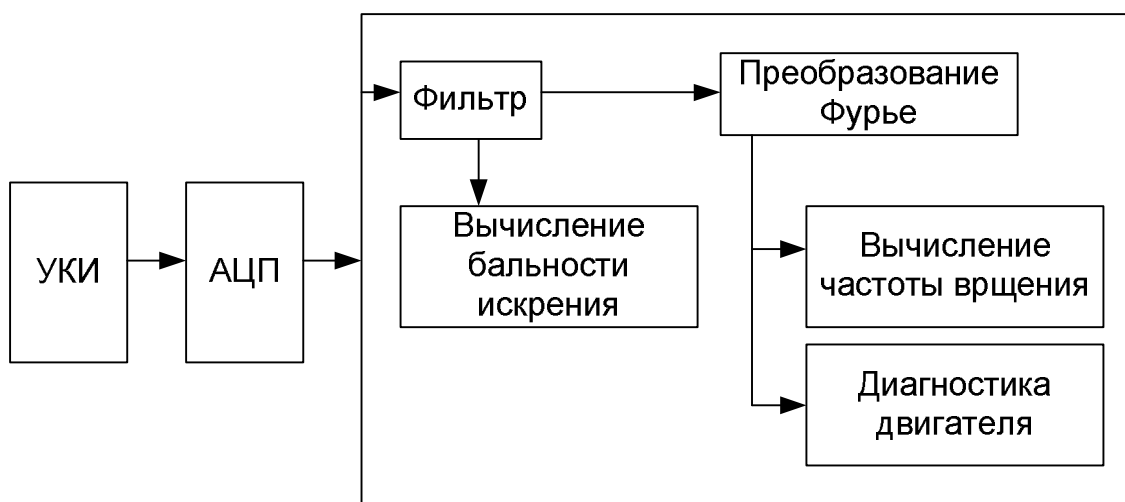


Рис. 2.

При выполнении научно-исследовательской работы решены следующие задачи:

- Рассмотрена необходимая для исследования техническая литература;
- Обоснован выбор добавочного тока коммутации в качестве информационного сигнала для диагностики ТЭД;
- Разработан способ измерения добавочного тока с целью выявления технических неполадок ТЭД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ю. Коньков. Основы технической диагностики локомотивов // Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2007.
2. Петухов В.С., Жуков С.В. Диагностика состояния электродвигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока. 2007.
3. Авилов В.Д., Беляев В.П., Исмаилов Ш.К., Харламов В.В. Диагностирование и настройка коммутации тяговых и других коллекторных электрических машин. Омск 2002, с. 63-66.
4. Авилов В.Д., Савельева Е.Н., Улучшение условий коммутации крупных машин постоянного тока с составными щетками, – В кн.: Тез.докладов науч.-техн. конф. кафедр Омского ин-та инж. Ж.-д. транспорта. – Омск, 1984, с.79-80.

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КАБЕЛЯ ДЛЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА**

Стасевская А.И., Анисимова О.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Источники возобновляемой энергии – один из самых современных способов получения электричества с использованием таких природных явлений, как: ветра, воды и солнечного тепла. Прогнозы учёных относительно развития этого направления говорят о том, что доля возобновляемых источников в мировом масштабе энергопотребления может составить к 2030 году до 20–30 %. Примечательно, что ветроэнергетические установки среди прочих нетрадиционных источников энергии получили, пожалуй, самое широкое распространение.

Энергия ветра неисчерпаема, повсеместно доступна и более экологична. В первой половине 2013 г по всему миру было установлено 1 080 МВт мощностей ветроэнергетических установок, то есть за 6 месяцев их общемировая мощность выросла на 20 %. Морские ветротурбины дают электричество стабильнее наземных, однако нужда в фундаментах ограничивает их мелководьем и задирает цены на энергию. В итоге к июлю 2013 г общая мощность морских ветряков поднялась до 6 500 МВт и до конца 2015 г возрастет, по меньшей мере, до 7 100 МВт, что позволяет говорить о дальнейшем развитии ветроэнергетики.

На сегодняшний день одним из сдерживающих факторов развития данного вида энергии в России являются особенности климата тех регионов, где установка генератора наиболее рациональна. Представляется целесообразным оценить, какие задачи с точки зрения использования возобновляемых источников энергии, а именно ветроэнергетики, возникают перед производителями кабелей.

Имеющиеся многочисленные зарубежные проекты не в полной мере соответствуют предъявляемым требованиям эксплуатации, что влечет за собой внесение существенных изменений. Таким образом, помимо основного оборудования и металлоконструкций это касается и кабельно-проводниковой продукции, используемой в изделиях.

Целью статьи является разработка рекомендаций по выбору изоляционных материалов для кабелей, используемых в ветрогенераторах.

В настоящее время на территории РФ не существует отдельного класса кабельных изделий для ветроэнергетических установок. Используются кабели более или менее удовлетворяющим требованиям, что соответственно и ведет к снижению срока службы кабельного изделия.

Наибольшую сложность с позиции разработчиков кабелей представляет вывод электроэнергии вдоль башни. Дело в том, что в зависимости от направления ветра корзина ветроэнергетической установки может поворачиваться вокруг своей оси, поэтому кабель подвергается многократному кручению, в том числе при отрицательных температурах окружающей среды (до – 40 °С). Следует, кабель должен выдерживать большие крутящие нагрузки, обладать особыми механическими и температурными характеристиками, особой прочностью на растяжение.

Очевидно, что кабели известных конструкций не удовлетворяют требованиям, предъявляемым условиями их эксплуатации в течение всего срока службы, и их неизбежная замена в то или иное время является очень дорогостоящим мероприятием.

Поэтому в настоящее время на основе зарубежных стандартов могут быть сформулированы следующие требования к кабелям, используемым в башне ветроэнергетической установки [4, 5]:

- высокие показатели механических характеристики (соответствие стандарту МЭК 60811-1-2);
- стойкость к действию агрессивных сред; (соответствие стандарту МЭК 60811-2-1);
- пожаробезопасность (соответствие стандарту МЭК 60332-1);
- обеспечение в условиях возгорания плотности дыма, не превышающей заданной (соответствие стандарту МЭК 61034-2).

Для выбора изоляционного материала для кабелей, используемых в ветряных установках, были проведены испытания в области теплового старения и старения в агрессивной среде, существующих конструкций на соответствие выше сформулированным требованиям. Были выбраны кабели с изоляцией и оболочкой из поливинилхлорида (ПВХ), полиэтилена (ПЭ) и термоэластопласта (ТЭП).

Методика испытаний проводилась следующим образом:

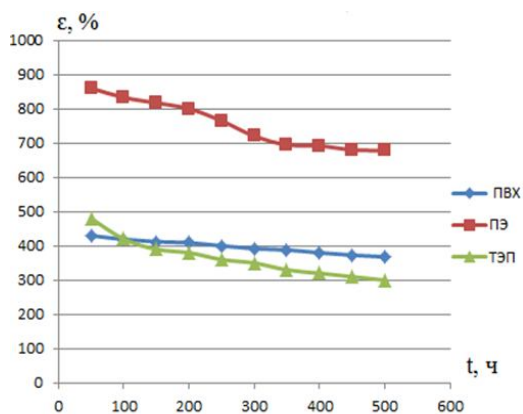
Тепловое старение в проводилось соответствие стандарту ГОСТ МЭК 60811-1-2-2011.

Испытания в агрессивных средах проводилось в соответствии стандарту ГОСТ МЭК 60811-1-1-2006.

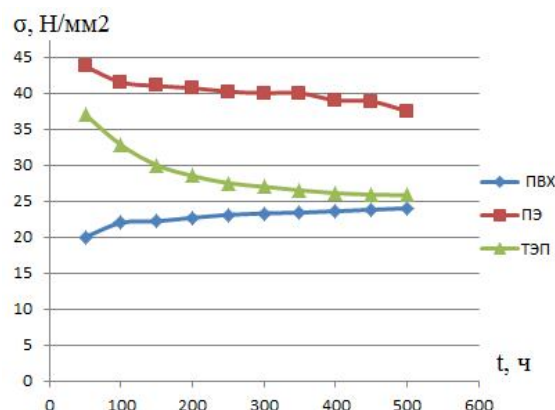
Данные образцы кабелей соответствуют существующим стандартам, прошли контрольные испытания и не являются дефектными.

Под действием повышенной температуры в материале происходят химические и физические изменения, которые приводят к постепенному изменению структуры и свойств материалов. Проведем оценку результатов исследования полимерных материалов в области теплового старения.

На рисунках 1, 2 приведены результаты измерений в области теплового старения относительного удлинения при разрыве  $\epsilon_r$  и прочности на разрыв  $\sigma_r$  в зависимости от времени старения для каждого полимерного материала:



**Рис. 1.** Относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_r$  для оболочек кабелей из ПВХ, ПЭ, ТЭП



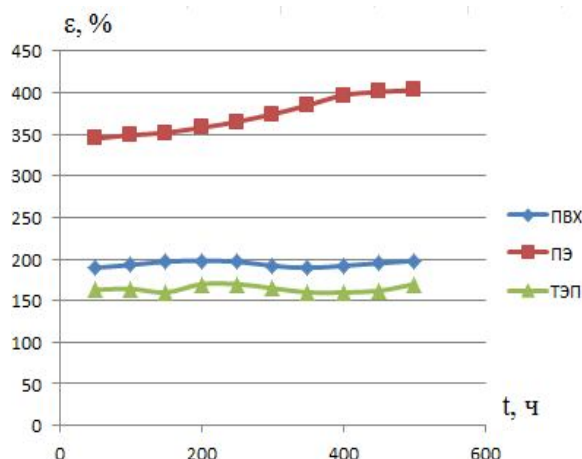
**Рис. 2.** Прочность на разрыв  $\sigma_r$  для оболочек кабелей из ПВХ, ПЭ, ТЭП

Согласно полученным данным, относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_r$  гораздо ниже у ТЭП, по сравнению с ПЭ и ПВХ пластикатом, а предел прочности на разрыв  $\sigma_r$  ПВХ пластиката гораздо ниже по сравнению с пределом прочности ПЭ и ТЭП. Таким образом, скорость протекания описанных процессов зависит от скорости изменения концентрации различных добавок: стабилизатора или пластификатора, а так же его распределения по объему оболочки кабеля и от степени усадка.

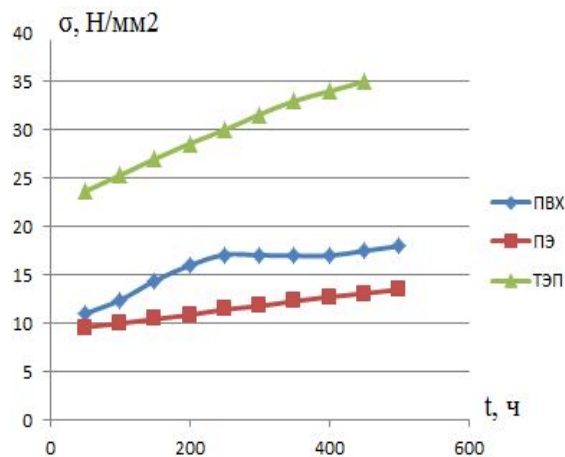


Стойкость полимерных материалов к воздействию агрессивных сред является основным свойством, определяющим целесообразность применения и срок службы кабельного изделия.

На рисунках 3, 4 приведены результаты измерений относительного удлинения при разрыве  $\epsilon_p$  и прочности на разрыв  $\sigma_p$  в зависимости от времени старения для каждого полимерного материала:



**Рис. 3.** Относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_p$  для оболочек кабелей из ПВХ, ПЭ, ТЭП



**Рис. 4.** Прочность на разрыв  $\sigma_p$  для оболочек кабелей из ПВХ, ПЭ, ТЭП

Скорость протекания деструкционных процессов происходящих в полимере, зависит от способности полимера сопротивляться разрушительному воздействию температуры, агрессивной среды и воздействию механических сил. Факторы, участвующие в ухудшении свойств материала, так же определяются конструкционными особенностями кабеля, надмолекулярной структурой полимера, технологическими режимами при изготовлении кабеля, влажностью и давлением окружающего воздуха.

Подводя итоги, можно констатировать, что по результатам проведенных механических испытаний для каждого полимерного материала из графиков видно, что максимальное сохранение механических характеристик в области теплового старения составило у ПЭ:

Относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_p = 880\%$

Прочность на разрыв  $\sigma_p = 44$  Н/мм<sup>2</sup>

По результатам старения в агрессивной среде, максимальное сохранение механических характеристик составило:

Относительное удлинение при разрыве, так же у ПЭ, где  $\epsilon_p = 350\%$

Прочность на разрыв у ТЭП, где  $\sigma_p = 22$  Н/мм<sup>2</sup>

По результатам проделанной работы, рекомендуемый изоляционный материал в конструкции кабеля для ветрогенератора – кабель с изоляцией и оболочкой из ПЭ. В соответствии данной конструкции, данный полимерный материал максимально сохраняет комплекс положительных свойств полимера, по результатам проведенных испытаний, обладает лучшими показателями механических характеристик и является наиболее устойчивый к тепловому старению и старению в агрессивной среде.

Соответствие требованиям, предъявляемым к кабелям для ветроэнергетических установок, а так же свойства полимерных материалов и их длительное сохранение, существенно влияют на срок службы кабельного изделия и целесообразность применения в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. (курс лекций) Кафедра теплоэнергетических систем, – М.: 2004. – 348 с.
2. Голицын М.В., Баженова О.Н., Пронина Н.В., Архипов А.Я., Макарова Е.Ю. Энергия: экономика, техника, экология. – М.: Наука, 2010. – 125
3. Миткевич А.С., Паверман Н.Г., Елагина А.Н. Кабельные композиции на основе полиэтилена и поливинилхлорида. Тенденции развития в России // Кабели и провода. – М.: 2007. - с. 3-7.
4. Моисеева В.Г. Термоэластопласты. / В.Г. Моисеева М., Химия 1985. -184с.

## К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ КАБЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЧЕСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА

Котов В.В., Щербакова Ю.М.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В последнее годы широко внедряется частотный способ плавного регулирования электроприводов, построенных на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Данный способ основан на использовании преобразователей частоты (ПЧ). Силовая часть такого ПЧ состоит из регулируемого выпрямителя, фильтра и автономного инвертора на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Большими преимуществами использования частотных преобразователей являются высокая точность и возможность постоянно управлять крутящим моментом и скоростью двигателя. Однако у такой системы управления есть существенные недостатки: сильное электромагнитное излучение и большие перенапряжения в кабеле питания электродвигателя.

Высокий уровень электромагнитных помех обусловлен очень короткими интервалами включения и выключения БТИЗ и высокой частотой импульсов частотного преобразователя (до 20 кГц). Это приводит к искажению синусоидальности напряжения на выходе преобразователя. Сильное электромагнитное излучение, обусловленное в значительной мере кабелем питания электродвигателя, вызывает наводки на элементы распределительной сети, устройства и информационные сети. Хорошее экранирование кабелей обеспечивает нейтрализацию этого излучения.

Другой проблемой являются возросшие электрические нагрузки на систему изоляции. Напряжение, генерируемое преобразователем частоты, имеет основную волну приблизительно синусоидальной формы с частотой от 0 до 400 Гц в зависимости от скорости вращения. Однако в процессе работы также образуются более высокие гармоники на частотах примерно до 100 МГц. Сигнал основной частоты и более высоких гармоник передается по кабелю питания к электромотору.

В процессе работы на концах кабеля возможно образование импульсных волн, которые в свою очередь создают перенапряжения вследствие отражения гармоник (т.н. эффект отраженной волны). Этот эффект возникает когда длина кабеля питания превышает длину волны гармоники. Если длина меньше длины волны гармоники, то переходные процессы проявляются на выходе частотного преобразователя. В результате генерируется напряжение, превышающее номинальное напряжение электромотора в 2 – 3 раза, что создает чередующие нагрузки на полимерную изоляцию. Этот фактор должен учитываться при конструировании изоляции кабеля, чтобы

избежать повреждений (например, прогорания изоляции вследствие образования дуги между жилой и экраном).

Помимо этого, перенапряжения, действуя с частотой до 10-4 с, могут в 10 раз превышать значение питающего напряжения. Как следствие резко снижается срок службы питающего кабеля.

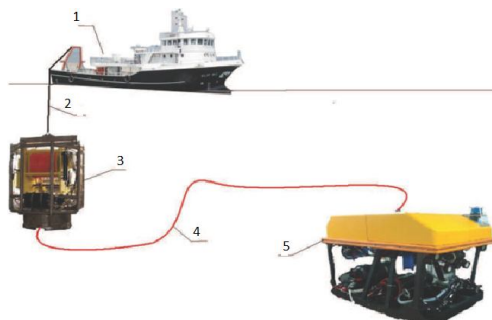
В последнее время рядом ведущих зарубежных кабельных компаний уже разработаны и выпускаются специальные кабели для частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией. В настоящее время в РФ работы по созданию подобной конструкции находятся на начальной стадии. Не достаточно информации о эксплуатации систем частотно-регулируемого привода, о методах и критериях оценки стойкости к перегрузкам, способах и средствах защиты от коронных разрядов. В ходе выполнения проекта планируется разработать кабельные изделия, адаптированные для работы в частотно-регулируемом приводе с широтно-импульсной модуляцией, а также рекомендаций по их применению.

## ВЫБОР ТИПА И КОНСТРУКЦИИ ПОГРУЖНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

День Конг Кюи

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

С повышением потребности в геологических исследованиях и разработках морских ресурсов автономные системы электропитания (СЭП) телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА) перестают отвечать предъявляемым к ним требованиям. Лучшим решением является использование СЭП, обеспечивающейся судном (рис. 1) [1]. Важнейшие преимущества этой СЭП заключаются в обеспечении длительного времени работы ТПА и возможности совместной работы ТПА с разными мощностями.



**Рис. 1.** Общая схема комплекса телеуправляемого подводного аппарата:

1 – обеспечивающее судно; 2 – кабель-трос; 3 – гараж-заглубитель; 4 – плавучий кабель; 5 – телеуправляемый подводный аппарат

Дальнейшее совершенствование СЭП ТПА обеспечивается повышением эффективности работы отдельных устройств СЭП ТПА. Важнейшим звеном СЭП ТПА при передаче энергии на переменном токе по кабель-тросу является погружной трансформатор (ПТ). Он составляет основную часть массы и габаритов СЭП, работает на большой глубине (до шести километров) при высоких значениях частоты (до десяти килогерц), напряжения (до десяти киловольт) и мощности (десятки киловатт).

Возможны следующие направления совершенствования ПТ:

– выбор типа и конструкции трансформатора;

- выбор материалов обмотки, магнитопровода, электрической изоляции и т.д.;
- выбор системы охлаждения трансформатора.

В настоящее время в зависимости от уровня напряжения и мощности используются различные типы трансформаторов. Для напряжения от 35 кВ используются только масляные трансформаторы (МТ), а элегазовые трансформаторы (ЭТ) начали использоваться в России несколько лет назад. Для напряжения до 35 кВ, используются масляные и сухие трансформаторы (СТ). В таблицах 1 и 2 приведены технические характеристики этих трансформаторов.

**Таблица 1.** Технические характеристики трансформаторов класса напряжения до 35 кВ

Технические характеристики	Напряжение 35 кВ		Напряжения до 10 кВ	
	МТ марки ТМ-160	СТ марки TS3R36.160	СТ марки ТСЛ-25/10)	МТ марки ТМГМШ 25/10)
Напряжения обмоток, кВ	0,4/35	0,4/35	0,4/6	0,4/6
Мощность, кВА	160	160	25	25
Масса, т	0.874	1,02	0,225	0,24
Габариты, м	1,06x0,76x 1,515	1,36x0,67x 1,38	0,655x0,345 x 0,656	0,8x0,64x0, 93
Суммарные потери, кВт	2.91	3,850	0,6	0,68
Удельная масса, кг/кВА	5,463	6,375	9	9,6
Удельные габариты, м <sup>3</sup> /кВА	0,0763	0,00786	0,00593	0,0191
Потери мощности по отношению к полной, %	1,82	2,41	2,4	2,72

По конструкции в классе напряжения до 10 кВ, используются все конструкции трансформаторов, хотя броневые трансформаторы используются реже. В таблице 3 приведено сравнение тороидального и стержневого трансформаторов.

**Таблица. 3.** Технические характеристики тороидального и стержневого трансформаторов

№	Технические характеристики	Низкое напряжение	
		ТТ марки ОСТ-1,0 УЗ	СТТ марки ОСЗ-1,0
1	Напряжения обмоток, В	220÷660/ 12÷660	220/ 12÷220
2	Количество фаз	1	1
3	Мощность, кВА	1	1
4	Масса, кг	6,8	16
5	Габариты, мм	155x55x75	155x275x270
6	Удельная масса, кг/кВА	6,8	16
7	Удельные габариты, м <sup>3</sup> /кВА	0,00495	0,01151

По сравнению со стержневым трансформатором (СТТ), тороидальный имеет следующие преимущества:

- тороидальный сердечник имеет идеальную форму, позволяющую изготовить трансформатор с использованием минимального количества материала. Равномерное распределение всех обмоток по всей окружности сердечника уменьшает длину обмоток, следовательно, уменьшается сопротивление обмоток и повышается КПД трансформатора;
- тороидальный трансформатор (ТТ) обеспечивает снижение уровня магнитных помех в восемь раз относительно СТТ, что обуславливает низкие потери мощности ТТ.

В качестве материалов обмоток трансформатора преимущественно используются медь и алюминий. Каждый материал обладает своими преимуществами и недостатками. Например, медная обмотка (МО) обеспечивает низкие потери мощности из-за хорошей теплопроводности (теплопроводность меди в два раза больше теплопроводности алюминия) и высокой электрической проводимости меди (в 1,5 раза больше проводимости алюминия). Трансформаторы с медными обмотками часто имеют небольшие габариты. Несмотря на большие габариты трансформатор с алюминиевыми обмотками (АО) дешевле и легче, чем трансформатор с МО (алюминий в три раза дешевле и в 2,5 раза легче, чем медь). На практике чаще используются трансформатор с АО для класса напряжения до 1 кВ, а трансформатор с МО для напряжения от 1 кВ (см. таблицу 4).

**Таблица 4.** Технические характеристики трансформаторов с АО и МО

№	Технические характеристики	Низкое напряжение		Высокое напряжение	
		Трансформатор с АО (НТС-30 У2)	Трансформатор с МО (ТПЗ-25)	Трансформатор с АО (ТМ-25/10)	Трансформатор с МО (ТЛС-25)
1	Напряжения обмоток, кВ	0,38/0,22	0,38/0,22	0,4/6	0,4/6
2	Мощность, кВА	28	25	25	25
3	Масса, кг	160	240	240	240
4	Габариты, мм	750x620x580	760x720x790	850x540x930	656x296x758
5	Суммарные потери, кВт	-	-	0,76	0,65
6	Удельная масса, кг/кВА	6,4	9,6	9,6	9,6
7	Удельные габариты, м <sup>3</sup> /кВА	0,0101	0,0173	0,0171	0,0059

В качестве материала магнитопроводов применяются аморфные и нанокристаллические сплавы. Применение магнитопроводов на основе аморфных и нанокристаллических сплавов обеспечивает снижение потерь холостого хода трансформаторов более, чем в пять раз по сравнению с традиционными магнитопроводами из электротехнической стали. Магнитопроводы из аморфных и нанокристаллических сплавов имеют значительно меньшие удельные магнитные потери по сравнению с ферритами, электротехнической сталью и пермаллоем. Они обладают высокой относительной начальной и максимальной магнитной проницаемостью и индукцией насыщения на высоких частотах. Высокое значение удельного сопротивления аморфных сплавов (в три раза больше, чем у кристаллических аналогов) обеспечивает низкие потери на вихревые токи и хорошие характеристики магнитной проницаемости.

Первый опытный трансформатор с магнитопроводом из аморфных сплавов в России изготовлен Минским электротехническим заводом им. В. И. Козлова в 2013 году. Проведены предварительные испытания трансформатора, результаты которых превзошли все ожидания. В частности, потери холостого хода снижены в четыре раза по сравнению со стальными магнитопроводами [2]. В таблице 5 приведено сравнение аморфного трансформатора Китайского завода (S(B)H15-M 100/10) с Российским стальным трансформатором (ТМГ 100/10). Из таблицы видно, суммарные потери что трансформатор с аморфными магнитопроводами снижены на 30% по сравнению с СТ, в том числе потери холостого хода снижены на 75.4% .

**Таблица 5.** Технические характеристики аморфного и стального трансформаторов

Технические характеристики	Напряжения обмоток, кВ	Потери холостого тока, кВт	Потери короткого замыкания, кВт	Суммарные потери, кВт
S(B)H15-M 100/10	0,4/10	75	1500	1575
ТМГ 100/10	0,4/10	305	1970	2275

Заключение.

В данной работе проведен анализ технических характеристик трансформаторов. Показано, что для разного класса напряжения применяются разные типы и конструкции трансформаторов. В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к электрооборудованию ТПА, ПТ рекомендуется изготавливать тороидальной конструкции с воздушным охлаждением, медными обмотками и аморфным магнитопроводом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рулевский В.М. Системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата большой энерговооруженности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – 2006. – 196 с.
2. Трансформаторы серии ТМГ 24. Режим доступа: [\[http://www.elcom.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=595&Itemid=200\]](http://www.elcom.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=595&Itemid=200)

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Сидоров С.А.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

На современном этапе развития промышленности, количество и качество выпускаемой продукции во многом зависит от надежности электроснабжения и качества электроэнергии (КЭ). Ухудшение КЭ зачастую обусловлено широким применением мощных однофазных нагрузок, работа которых приводит к неравномерному распределению нагрузки по фазам сети и появлением несимметричных режимов работы в трехфазных сетях. Суммарная нагрузка некоторых предприятий содержит 85–90% несимметричных нагрузок. Характеристики некоторых электропотребителей (ЭП), вызывающие несимметрию напряжения приведены в таб. 1 [1].

**Таблица 1.** Характеристики ЭП, вызывающих несимметрию напряжений

Тип ЭП	U, кВ	$K_{2U}, \%$
Дуговая сталеплавильная печь ДСП-100	220	1,3
	35	4,5
Дуговая сталеплавильная печь ДСП-40	110	1,4
	35	4,0
Однофазные электротермические установки	10	18
Тяговые подстанции переменного тока	110	4,6
	6	1,4
Прокатный стан 1700	10	2,0
Сварочные машины	0,4	1-5

Требования к КЭ в электрических сетях общего назначения приведены в ГОСТ Р 54149—2010, согласно которому значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю и 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю [2].

Низкое качество электроэнергии отрицательно сказывается на работе релейной защиты, автоматики, аппаратуры связи, приводит к уменьшению срока службы изоляции кабелей, электрических машин, трансформаторов, батарей конденсаторов и т.д. [3].

Снижение несимметрии напряжения может быть достигнуто либо уменьшением сопротивления сети токам обратной и нулевой последовательности, либо снижением этих токов. Учитывая, что сопротивление внешней сети (трансформаторов, кабелей, линий) одинаковы для прямой и обратной последовательностей, снизить эти сопротивления возможно лишь путем подключения нагрузки к отдельному трансформатору.

Снижение систематической несимметрии в сетях низкого напряжения осуществляется рациональным распределением однофазных нагрузок между фазами с таким расчетом, чтобы сопротивления этих нагрузок были примерно равны между собой. Рациональное перераспределение нагрузок не всегда позволяет снизить коэффициент несимметрии напряжений до допустимого значения (например, когда часть мощных однофазных электроприемников работает по условиям технологии не все время, а также при профилактических и капитальных ремонтах). В этих случаях необходимо применять специальные симметрирующие устройства.

Симметрирующие устройства могут выполняться как управляемыми, так и неуправляемыми. Выбор типа устройства определяется характером технологического процесса. Многие однофазные нагрузки, такие как индукционные тигельные печи, установки контактного нагрева, электропечи графитезации, характеризуются значительными колебаниями параметров нагрузки в процессе работы. Если во время технологического процесса мощность, потребляемая установкой изменится, то будет возникать несимметрия токов, а следовательно, и несимметрия напряжений, тем большая, чем больше глубина изменения активной мощности нагрузки  $\lambda$  (выражение 1).

$$\lambda = \frac{P_{0\text{МАКС}}}{P_{0\text{МИН}}} = \frac{S_{0\text{МАКС}}}{S_{0\text{МИН}}}, \quad (1)$$

где  $P_{0\text{МИН}}$ ,  $P_{0\text{МАКС}}$  – минимальная и максимальная активная мощность нагрузки,  $S_{0\text{МИН}}$ ,  $S_{0\text{МАКС}}$  – минимальная и максимальная реактивная мощность нагрузки.

Исходя из допустимой несимметрии напряжений, равной 2%, запишем выражение для допустимой глубины изменения мощности:

$$\lambda \leq 1 + \frac{2,67S_3 + S_{\text{К.З.}}}{50S_0 - 2,67S_3 - S_{\text{К.З.}}}, \quad (2)$$

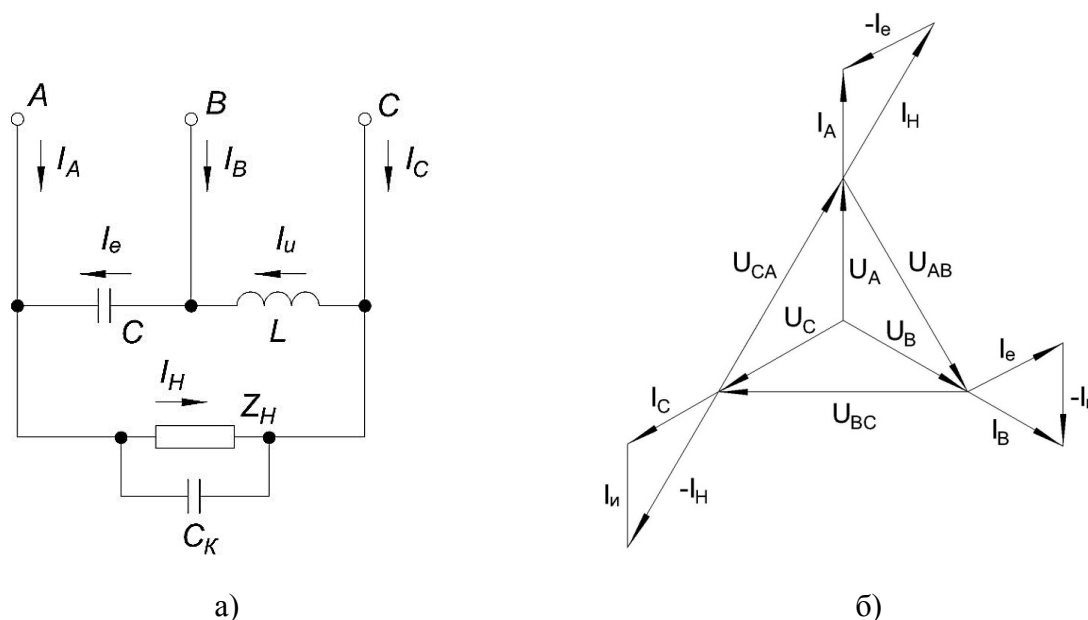
где  $S_3$  – мощность трехфазной нагрузки,  $S_{\text{К.З.}}$  – мощность короткого замыкания в точке подключения нагрузки.

При выполнении условия (2) несимметрия не превышает допустимой. В этом случае параметры симметрирующих элементов выбираются по максимальной мощности

нагрузки и могут оставаться неизменными (неуправляемое симметрирующее устройство). Если это неравенство не выполняется, то для обеспечения симметрирования сети необходимо изменить параметры симметрирующих элементов в ходе технологического процесса (управляемое симметрирующее устройство) [4].

Наибольшее распространение среди неуправляемых симметрирующих устройств получила изображенная на рис.1,а схема Штейнметца. Это обусловлено простотой схемы, включением симметрирующих элементов и нагрузки на линейное напряжение, коэффициентом мощности трехфазной сети, равным единице. Векторная диаграмма токов и напряжений приведена на рис.1,б.

Суммарная мощность симметрирующих элементов  $C$  и  $L$  составляет при этом 1,16 активной мощности нагрузки  $P_0$ . Однако схема Штейнметца эффективна при симметрировании чисто активной нагрузки. С другой стороны, многие промышленные однофазные нагрузки имеют индуктивный фазовый угол. Это означает, что при применении схемы Штейнметца обязательным является доведение коэффициента нагрузки до единицы. Поэтому в затраты на оборудование при симметрировании по схеме Штейнметца входят еще затраты на компенсирующую батарею конденсаторов.



**Рис. 1.** Схема Штейнметца (а), векторная диаграмма токов и напряжений (б)

В настоящее время для симметрирования однофазных нагрузок широко применяются силовые управляемые вентили, с помощью которых можно осуществить фазовое и широтно-импульсное регулирование. Одним из таких устройств являются статический компенсатор реактивной мощности типа СТАТКОМ, работающий в режиме симметрирования нагрузки. Устройство позволяет плавно регулировать в широком диапазоне несимметрию токов и устранить ток в нейтрали. Кроме того, при реализации компенсатора на базе СТАТКОМ возможно совместить функции симметрирования токов и компенсации реактивной мощности. Устройство СТАТКОМ подключается параллельно с сетью, на рис. 2 приведена схема подключения к трехфазной сети с нейтральным проводом.



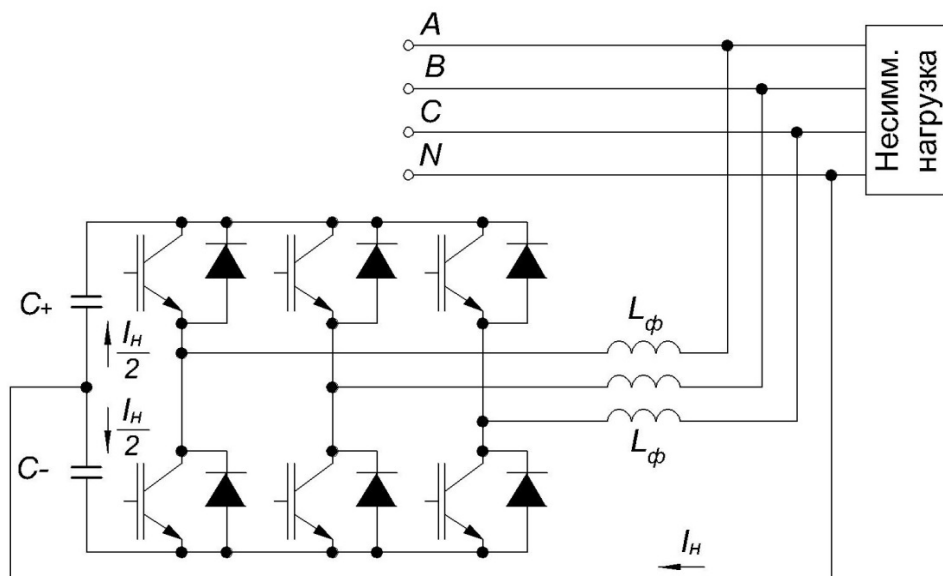


Рис. 2. Структурная схема СТАТКОМ

Устройство компенсации несимметрии на базе СТАТКОМ состоит из трехфазного моста, собранного на шести полностью управляемых ключевых элементах (например IGBT-транзисторах), конденсаторов на стороне постоянного тока моста и выходных дросселей на стороне переменного тока моста. Конденсатор выполняет функцию накопителя электроэнергии, значение которой определяет уровень напряжения на стороне постоянного тока. Выходные дроссели на стороне переменного тока моста служат для фильтрации модуляционных составляющих токов, возникающих в результате работы ШИМ, и одновременно обеспечивают их непрерывность. В систему управления, реализуемую на микропроцессоре, поступают данные от датчиков, система вычисляет опорные сигналы в соответствии с режимом работы компенсатора и формирует импульсы управления ключам мостового преобразователя компенсатора.

Данное устройство компенсации несимметрии позволяет плавно регулировать в широком диапазоне несимметрию токов, устранять ток в нейтрали и вместе с тем компенсировать реактивную мощность. Недостатками устройства являются необходимость четвертого проводника – нейтрали и наличие двух больших емкостных накопителей энергии.

Поэтому желательно вместо конденсаторных батарей использовать реактор в качестве источника реактивной мощности [5]. Тем более что многие специалисты в области силовой электроники питают надежды на появление в недалеком будущем дешёвых сверхпроводниковых реакторов. Симметрирующее устройство на базе индуктивного накопителя энергии симметрирует токи и улучшает коэффициент мощности в автоматическом режиме, но не требует наличия нейтрального проводника, в схеме силовой части отсутствуют выходные дроссели, на стороне постоянного тока только один индуктивный накопитель энергии, который имеет меньшую стоимость и проще в изготовлении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с.
2. ГОСТ Р 54149—2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012.

3. Распопов Е.В. Электрические системы и сети. Качество электроэнергии и его обеспечение: конспект лекций. – Л.: СЗПИ, 1990. – 48 с.
4. Гитгарц Д.А., Мнухин Л.А. Симметрирующие устройства для однофазных электротермических установок. – М.: Издательский центр «Энергия», 1974. – 120 с.
5. Сидоров С.А., Рогинская Л.Э. Симметрирование трехфазных сетей при несимметричной нагрузке: сб. науч. тр. / Интеграция образования, науки и производства в условиях многоуровневого профессионального образования. – Кумертау: филиал Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2014. – С. 167–169.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ КОНТУРА ТОКА СИСТЕМЫ ИРН-ДПТ В СРЕДЕ MEXBIOS

Быковских П.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Цель данной статьи – показать возможность и адекватность работы высокопроизводительного микропроцессора в режиме работы с минимальной частотой квантования, достаточной для устойчивого функционирования системы в целом, рассмотренной на примере системы управления ДПТ в контуре тока.

Актуальность данной тематики очень важна в современных электроприводах, эксплуатируемых в нашей стране. В настоящее время Российская оборонная промышленность и различные гос. корпорации переходят на системы управления электроприводами с использованием отечественных микропроцессоров, которые, к сожалению, отстают от западных в технологическом развитии примерно на 10 лет. В работе представлены результаты исследований, которые доказывают, что возможно получить регулирование координаты электропривода высокого качества (в данном случае тока якоря ДПТ) при невысокой производительности микропроцессора. Благодаря этому возможно составить конкуренцию ведущим западным производителям микропроцессорной техники, таким как Китай и США, в области программно-аппаратной реализации подобных систем управления.

Исследования проведены на лабораторном стенде МСВ-02 с источником питания 24 В постоянного тока и двигателем марки SVF5539 [1].

Система управления ДПТ реализуется на сигнальном микроконтроллере производства фирмы *Texas Instruments* и обеспечивает формирование ШИМ-сигналов управления четырьмя ключами по цепи якоря на базе многоканального ШИМ-генератора менеджера событий. Обратные связи по току якоря реализуются с помощью гальванически развязанных датчиков тока, выходные сигналы которых вводятся в контроллер через АЦП. Регуляторы тока реализованы программным способом. Система управления ДПТ реализована по принципу подчинённого регулирования и включает в себя три контура регулирования: тока, скорости и положения.

Синтез трёхконтурной системы управления ДПТ реализован методом визуального программирования в программной среде *MexBIOS™ Development Studio*, разработанной в лаборатории Микропроцессорных систем управления электроприводами кафедры ЭПЭО ЭНИН ТПУ [2].

**Настройка контура тока.** Структурная схема представлена на рис. 1а. Данный контур теоретически можно настроить по методике Кесслера на модульный оптимум, обеспечивая предельное быстродействие при перерегулировании на уровне 4,3 %, приняв за малую некомпенсируемую постоянную времени величину

$T_{\text{ит}}=T_{\text{п}}=1/2 \cdot f_{\text{шим}}=1/2 \cdot 5000=10^{-4}$  с. Полоса пропускания контура по управлению тогда будет равна  $\omega_{\text{yt}}=0,707/T_{\text{ит}}=0.707/10^{-4}=7070$  с<sup>-1</sup> или  $f_{\text{yt}}=1126$  Гц.

Практически же на настройку будет существенно влиять дискретность системы, т.к. шаг расчета практически равен величине постоянной времени  $T_{\text{ит}}=10^{-4}$  с. Соотношение между частотой квантования и полосой пропускания должно быть более  $f_{\text{кв}}/f_{\text{yt}}>10 \dots 20$ . Кроме того, обеспечивать полосу пропускания в контуре тока более 200...500 Гц, как правило, не нужно.

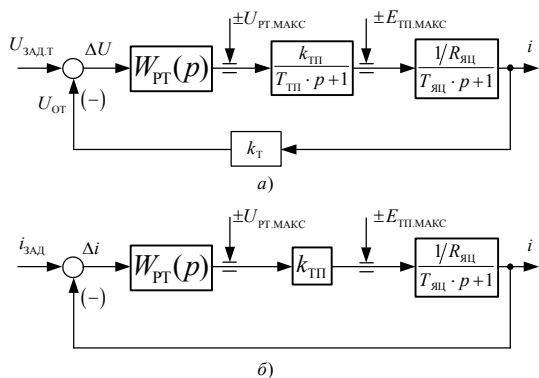


Рис. 1. Структурная схема контура тока

Тогда при настройке сделаем следующие допущения:

с учетом максимальной частоты расчета в ядре микроконтроллера 10 кГц аperiodическим звеном пренебрегаем;

обратную связь считаем безынерционной и настроенной на коэффициент  $k_{\text{д}}=1$ ;

требуемая полоса пропускания в контуре тока  $f_{\text{од}}=200$  Гц.

Тогда схему можно преобразовать к виду рис. 1б. После теоретической настройки контура необходимо обратиться к среде **MexBIOS**, в которой составляется алгоритм управления (рис. 2) с заданием всех необходимых условий и расчетных параметров: частоты дискретизации, постоянных времени, пропорционального и интегрального коэффициентов ПИ-регулятора.

При уменьшении частоты дискретизации в контуре вниз 10 кГц мы установили нижний предел частоты, при которой контур тока сохраняет свою устойчивость. Переходные процессы отслеживались на виртуальном осциллографе при задании входных воздействий на ПИ-регулятор тока.

Эксперимент производили при следующих частотах дискретизации: 10 кГц; 5 кГц; 1 кГц и 800 Гц. На рисунках 3...7 приведены временные диаграммы полученные в контуре тока при использовании генератора прямоугольных импульсов при малом задании  $I=0,25$  А (ПИ-регулятор не входит в насыщение, т.е. переменная задания не достигает сигнала ограничения). Для более наглядной оценки и анализа полученных диаграмм, отработанный сигнал задания сглаживается через аperiodическое звено третьего порядка.

На рис.4 получен переходный процесс без использования фильтра, по нему видно, что отработанный сигнал имеет большое количество пульсаций тока. Это характерная особенность появляется в ШИМ при коммутации силовых ключей, в данном случае IGBT транзисторов.

При частоте  $f=800$  Гц отработка задающего прямоугольного сигнала происходит с недорегулированием (рис.7). Если величина недорегулирования составляет менее 30% от заданного воздействия, то считается что, контур работает с максимальными отклонениями от заданных значений.

Недорегулирование определяется как разность между заданным и отработанным сигналами:  $\Delta=(I-I_{\text{ф}})/I \cdot 100=(0,25-0,18)/0,25 \cdot 100=28\%$ . Во время исследования установлено, что в интервале частот дискретизации 2...5 кГц наблюдается существенная вибрация якоря ДПТ, а в диапазоне от 1 кГц и ниже – характерное подергивание якоря ДПТ.

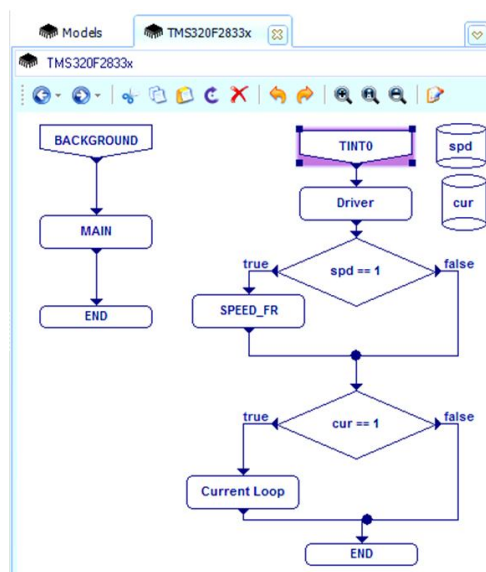


Рис. 2. Алгоритм управления

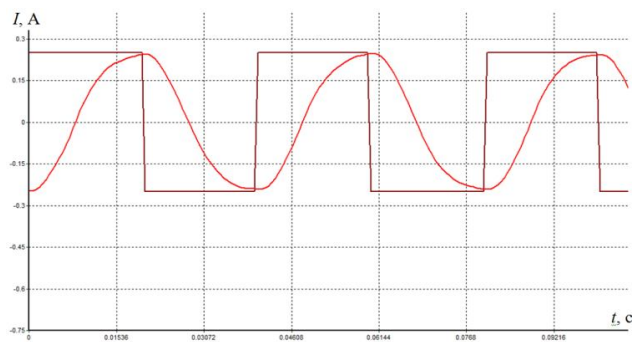


Рис. 3. Отработка задающего воздействия при частоте дискретизации  $f = 10$  кГц,  $I = 0.25$  А.

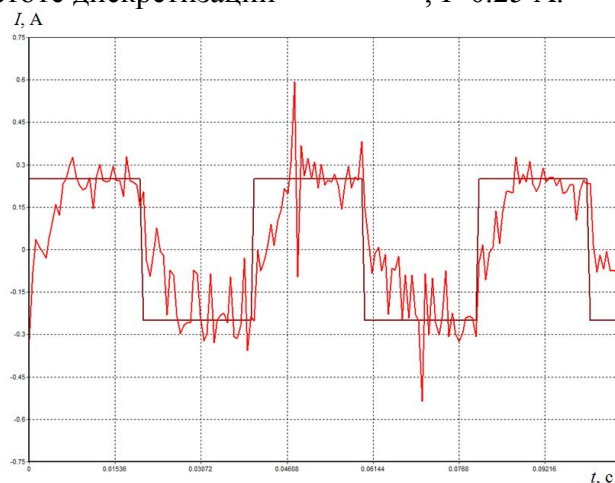


Рис. 4. Отработка задающего воздействия при частоте дискретизации  $f = 10$  кГц,  $I = 0,25$  А без использования аperiодического фильтра третьего порядка

При уменьшении частоты дискретизации от  $f = 10$  кГц и ниже происходит расширение спектра входного сигнала, что приводит к изменению масштаба некоторой части исходного спектра и к заполнению сигнала спектральными составляющими. Опасность этой операции состоит в том, что «крупный план» спектра может превысить границу – частоту Найквиста [3].

Превышение приведет к совмещению участков спектра, и тогда будет невозможно вернуть необходимую часть сигнала. Совмещение сигналов не будет, пока исходная полоса, занимаемая сигналом, меньше чем  $1/2$  от половины частоты дискретизации.

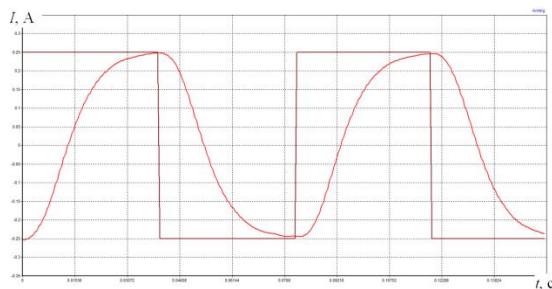
При  $f = 5$  кГц (рис.5) коэффициент уменьшения частоты дискретизации сигнала был равен 2, и следовательно, полоса, занимаемая сигналом удвоилась.

Согласно теории, частоту дискретизации не следует уменьшать ниже частоты Найквиста, однако в ходе проведенных экспериментов выяснилось, что контур тока обрабатывает заданный сигнал при частоте дискретизации не ниже  $f = 1$  кГц (рис.6) [4].

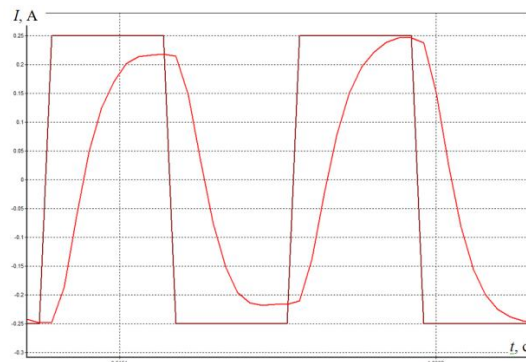
Преимущества уменьшения частоты дискретизации:

- снижает требуемую вычислительную мощность ядра микроконтроллера;
- снижает количество отсчетов во временной области, которое необходимо обработать, это позволяет

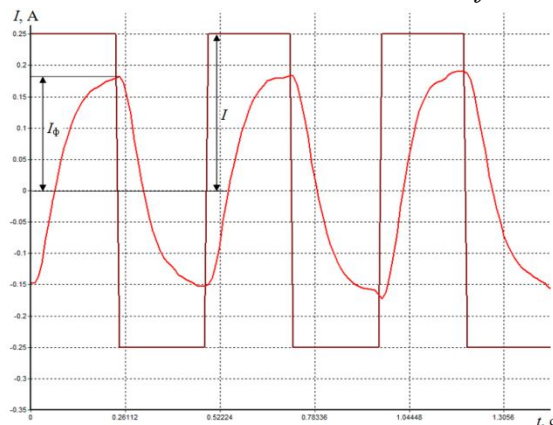
ускорить вычисления и обрабатывать более широкополосные сигналы;  
– уменьшает потребляемую мощность (что особо важно при батарейном питании);  
позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счёт предварительной фильтрации, за которой следует собственно уменьшение частоты дискретизации.



**Рис. 5.** Обработка задающего воздействия при частоте дискретизации  $f = 5 \text{ кГц}$ ,  $I = 0.25 \text{ А}$ .



**Рис. 6.** Обработка задающего воздействия при частоте дискретизации  $f = 1 \text{ кГц}$ ,  $I = 0.25 \text{ А}$ .



**Рис. 7.** Обработка задающего воздействия при частоте дискретизации  $f = 800 \text{ Гц}$ ,  $I = 0.25 \text{ А}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. ООО «НПФ Мехатроника-Про». [Электронный ресурс] – электрон. текст. Методика создания системы управления двигателем постоянного тока – Томск: 2011\_2014 Режим доступа: [http://www.mechatronica\\_pro.com/upload/products/positions/pdf](http://www.mechatronica_pro.com/upload/products/positions/pdf).
2. ООО «НПФ Мехатроника-Про». [Электронный ресурс] – электрон. текст. Дан. Начало работы – руководство для новых пользователей. – Томск: [б.и.], 2011-2014 – Режим доступа: <http://www.mechatronica-pro.com/ru/blog/>
3. Встраиваемые высокопроизводительные цифровые системы управления.: учеб. пособие / А.С. Анучин, Д.И. Алямкин, А.В. Дроздов и др.; под общ. ред. В.Ф. Козаченко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 270 с.
4. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

## РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рогинская Л.Э., Сысоева М.В., Муразымов А.Ю.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

При изменении режима работы трансформатора происходит переход от одного установившегося состояния к другому. Обычно этот процесс длится небольшое время, однако он может сопровождаться весьма опасными для трансформатора явлениями. Надежность работы трансформатора определяется не только его работой в установившихся режимах, но и в переходных, например, при включении. При включении трансформатора в сеть могут наблюдаться броски тока, называемые токами включения, превышающие значения номинального тока в установившемся режиме, хотя ток холостого хода не превышает 3-5 % номинального [1]. Такие толчки тока включения вызывают осложнения при конструировании и настройке защитных токовых реле трансформаторов, так как могут быть причиной ложных срабатываний этих реле при включении трансформатора на холостом ходу. Во время запуска трансформатора по его первичной обмотке протекают сверхтоки, которые неблагоприятно влияют на изоляционные свойства обмотки, вызванные резкими механическими воздействиями. 90% отказов трансформаторов происходит из-за пробоя изоляции [2].

Это актуально для силовых трансформаторов, где происходит большое накопление энергии в электромагнитном поле цепи, которое не изменяется мгновенно и напрямую влияет на ток включения. Чем больше запасенной энергии, тем дольше затухают сверхтоки. Отсюда следует, время протекания переменных механических воздействий будет проходить достаточно долго, тем самым ухудшая изоляционные свойства обмотки трансформатора. Поэтому при проектировании и эксплуатации трансформаторов нужно учитывать их свойства в переходных режимах.

Таким образом, знание характеристик трансформаторов и исследование их динамических процессов является актуальной научно-технической задачей. Решение ее позволит на этапе проектирования прогнозировать величину сверхтоков при включении трансформатора.

Чтобы проанализировать процесс намагничивания однофазного трансформатора в режиме холостого хода без учета потерь в стали, воспользуемся дифференциальным уравнением состояния для первичной обмотки [3] (рис. 1).

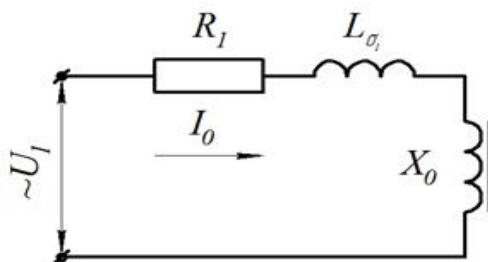


Рис. 1. Электрическая схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

На рис. 1 изображена электрическая схема замещения трансформатора в режиме холостого хода, где:  $R_1$ —активное сопротивление первичной обмотки;  $L_{\sigma_1}$ —индукция рассеяния первичной обмотки;  $X_0$ —индуктивное сопротивление первичной обмотки;  $U_1$ —подводимое синусоидальное напряжение первичной обмотки;  $I_0$ —ток холостого хода.

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt} = u \quad (1)$$

Уравнение для магнитной цепи составим на основании закона полного тока (второго закона Кирхгофа для магнитной цепи)

$$Hl = \sum F = F_1 + F_2 = w_1 i_1 + w_2 i_2 \quad (2)$$

Напряженность магнитного поля в сердечнике аппроксимируем с помощью гиперболического синуса

$$H = \alpha \cdot \text{sh}(\beta B) \quad (3)$$

Выразим магнитную индукцию в сердечнике через поток

$$B = \frac{\Phi}{Q}, \quad (4)$$

где  $Q$  – сечение стали стержня.

С учетом (2), (3), (4) получим

$$\alpha l \frac{\beta}{Q} \text{sh}\left(\frac{\beta \Phi}{Q}\right) = w_1 i_1 + w_2 i_2 \quad (5)$$

Продифференцировав уравнение (5) получим

$$\alpha l \frac{\beta}{Q} \text{ch}\left(\frac{\beta}{Q}\right) = w_1 \frac{di_1}{dt} + w_2 \frac{di_2}{dt} \quad (6)$$

Так как при холостом ходе  $i_2 = 0$ , получим

$$\alpha l \frac{\beta}{Q} \text{ch}\left(\frac{\beta}{Q}\right) = w_1 \frac{di_1}{dt} \quad (7)$$

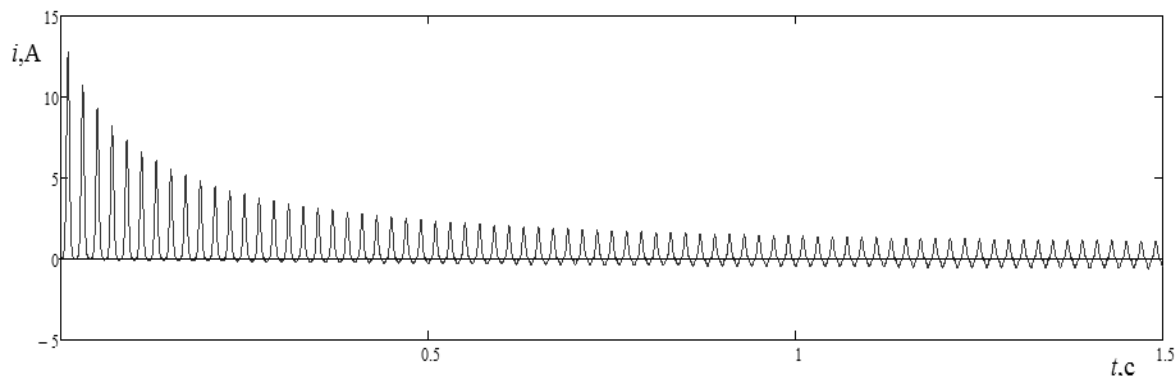
где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты аппроксимации, для стали марки 3405 приняты 83,834 и 2,833 соответственно.

Запишем систему двух дифференциальных уравнений (1) и (7) в канонической форме и решим систему уравнений в матричной форме. Решая эти уравнения в пакете *MathCad*, получим осциллограммы тока и магнитного потока.

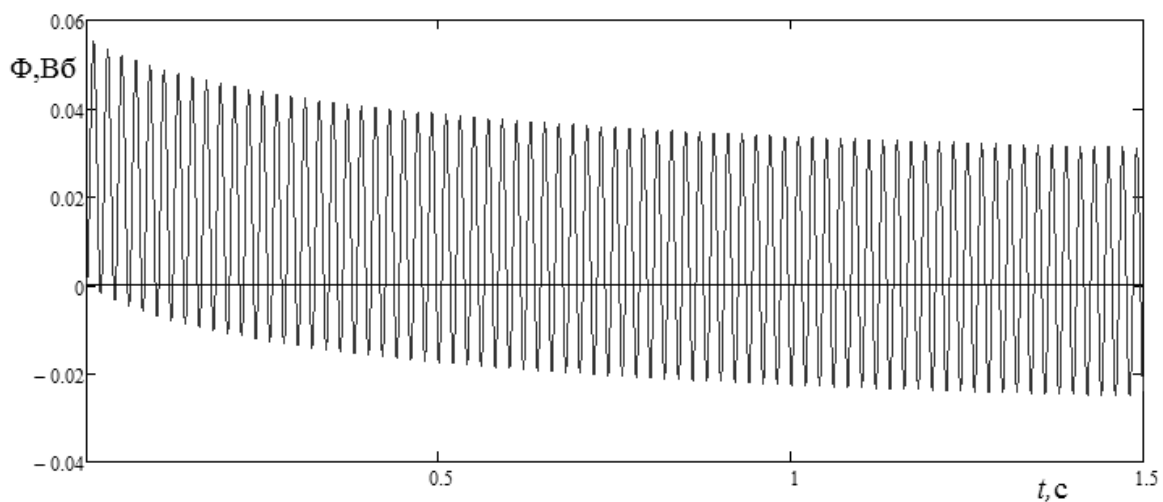
Для создания компьютерной модели воспользуемся конкретными значениями, рассчитанными для трансформатора типа ОМ – 533 – 35/10,5 – У1 и ТМ – 1600 – 35/10,5 – У1 [4].

Результаты расчетов приведены на рисунках 2-5.

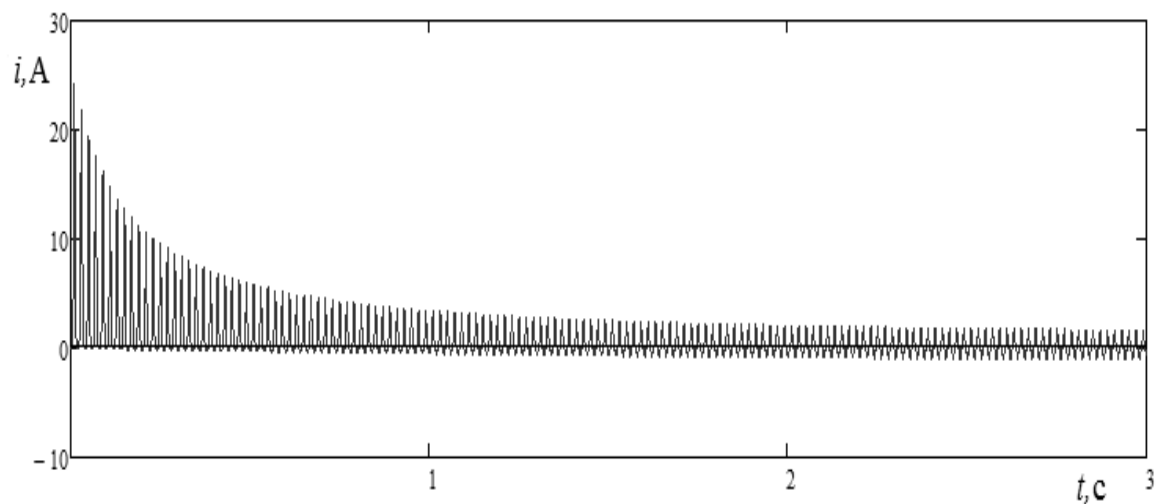
Каждую фазу трехфазного трансформатора рассмотрим отдельно.



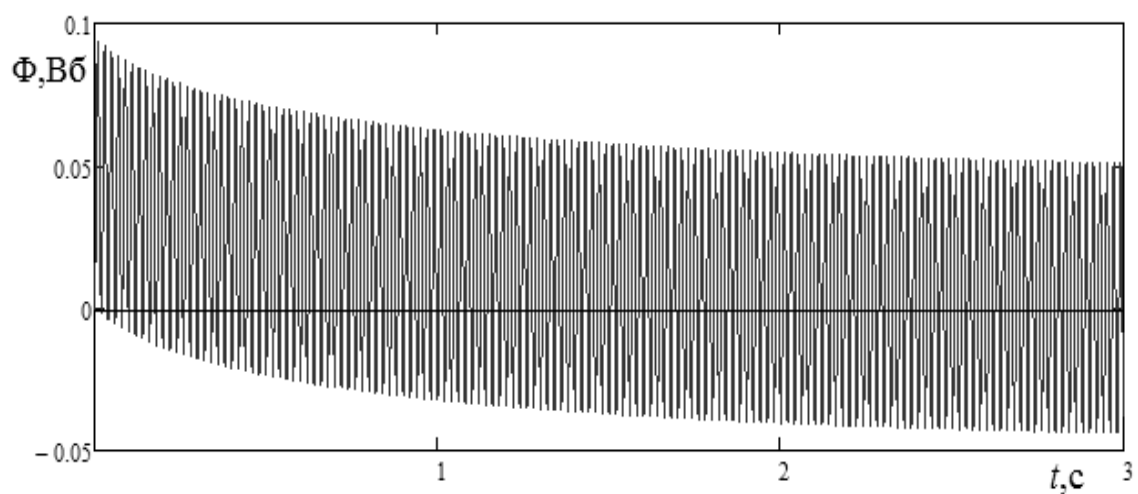
**Рис. 2.** Зависимость тока холостого хода от времени (однофазный трансформатор)



**Рис. 3.** Зависимость магнитного потока от времени (однофазный трансформатор)



**Рис. 4.** Зависимость тока холостого хода от времени (трехфазный трансформатор)



**Рис. 5.** Зависимость магнитного потока от времени (трехфазный трансформатор)



В рассчитанном однофазном трансформаторе бросок тока в момент включения равен 12,765 А, что составляет 84% номинального. Установившийся ток холостого хода равен 0,582 А и достигается спустя 1,5 секунды. В трехфазном трансформаторе бросок тока включения равен 24,29 А, что составляет 92% номинального. Установившийся ток холостого хода равен 1,053 А и достигается спустя 3 секунды. В данном случае величина тока не превышает номинального. Магнитный поток в однофазном трансформаторе достигает значения 0,06 Вб, что в 1,4 раза больше номинального, в трехфазном трансформаторе 0,1 Вб, что в 1,44 раза больше номинального значения.

Таким образом, при проектировании трансформаторов необходимо учитывать электромагнитные процессы при включении. Анализ переходных процессов в трансформаторе позволяет принимать обоснованные решения при разработке его конструкции и формировании требований к условиям эксплуатации трансформатора и средствам его защиты.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Ленинградское отделение издательства «Энергия», 1970. – 425 с.
2. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Надежность электрических машин. – М.: Академия, 2010. – 288 с.
3. Серебряков А.С. Трансформаторы. Учебное пособие. – Княгинино: НГИЭИ, 2010. – 300 с.
4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

### ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА НА РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Барсуков Д.А., Меркулов В.И.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Слоистые диэлектрики находят самое широкое применение в различных областях электротехники в качестве электрической изоляции в высоковольтных вводах, трансформаторах, электрических машин, изолирующих штанг и др. Электрическая прочность таких конструкций и, соответственно, надежность во многом определяется неоднородностью самих материалов и неоднородностью электрического поля, обусловленной особенностью этих конструкций.

Развитие пробоя в такой изоляции может развиваться по-разному за счет различия в значениях нормальной и тангенциальной составляющих напряженности электрического поля и будет зависеть от направления приложения электрического поля (вдоль или поперек слоев изоляции).

Установлено [1], что развитие всех этапов электрического старения сопровождается ионизационными процессами, интенсивность которых отражает динамику развития разряда, но не является определяющим фактором. Развитие частичных разрядов и, соответственно, ионизационных процессов приводит к образованию объемных зарядов. Эти заряды могут вызывать перераспределение электрического поля и, тем самым, оказывать влияние на длительность процесса старения. Поскольку контролировать такие объемные заряды достаточно сложно, в данной работе предполагается использование наведенного объемного заряда, возникающего при формировании термоэлектретов.

Целью статьи является оценка наличия и роли объемных зарядов в развитии разряда в процессе электрического старения слоистых диэлектриков.

При формировании термоэлектрического заряда было отмечено, что однородные диэлектрики малой толщины слабо подвержены поляризации при получении термоэлектрических зарядов. Композиционные диэлектрики, имеющие слоистую структуру, более подвержены поляризации [2]. Это связано с особенностью структуры таких диэлектриков, а именно, с наличием границы раздела слоев. Наличие границы раздела позволяет таким материалам сохранять поляризованное состояние в объеме диэлектрика на границах слоев с различной диэлектрической проницаемостью.

Измерение заряда электрета было проведено методом электростатической индукции с использованием пьезоэлектрического (виброизмерительного) преобразователя [3].

Испытания электрического старения были проведены на переменном напряжении частотой 50 Гц [4], в системе электродов игла – игла, создающих резко неравномерное электрическое поле. В качестве образцов использовалась комбинация из различных диэлектрических материалов (ПММА – имидофлекс, ПММА – полиимидная пленка). Расстояние между электродами составляло 20 мм. Количество образцов каждого материала при проведении испытаний составляло не менее 10.

Результаты экспериментов представлены в таблице 1, где  $\sigma_{ср}$  – среднее значение поверхностной плотности заряда материала диэлектрика.

**Таблица 1.** Среднее время до пробоя образца

Наименование материала	Сред. время до пробоя, мин
Напряжение старения U=21 кВ	
Полиимидная пленка (без заряда)	205,1
Полиимидная пленка ( $\sigma_{ср}=13,4$ пКл/м <sup>2</sup> )	199
Напряжение старения U=26 кВ	
Имидофлекс (без заряда)	486,3
Имидофлекс ( $\sigma_{ср}=59,3$ пКл/м <sup>2</sup> )	322,8
Имидофлекс ( $\sigma_{ср}=115$ пКл/м <sup>2</sup> )	226,8
Напряжение старения U=28 кВ	
Имидофлекс (без заряда)	58,2
Имидофлекс ( $\sigma_{ср}=59,3$ пКл/м <sup>2</sup> )	36,3
Имидофлекс ( $\sigma_{ср}=115$ пКл/м <sup>2</sup> )	33,1

Также следует отметить, что в образцах полиимидной пленки пробой происходит с выходом разряда на поверхность с последующим перекрытием разрядного промежутка по поверхности материала (рис. 1). А при испытании образцов имидофлекса 292 наблюдается эффект заглибления канала разряда в материал диэлектрика (рис 2).



**Рис. 1.** Развитие разряда в композиции ПММА – полиимидная пленка



**Рис. 2.** Развитие разряда в композиции ПММА–Имидофлекс 292

Согласно полученным данным видно, что при использовании полиимидной пленки, имеющей толщину равную 25 мкм, при напряжении электрического старения равном 21 кВ, влияние объемного заряда электрета на время развития пробоя практически не проявляется. Можно предположить, что это связано с тем, что пробой происходит с выходом разряда на поверхность с последующим перекрытием разрядного промежутка по поверхности материала [5]. Поскольку полиимидная пленка представляет собой однородный материал, не имеющий границы раздела в объеме, то электретный заряд формируется только на поверхности пленки, что и определяет выход разряда на поверхность с последующим развитием разряда по воздушному промежутку.

В случае образцов имидофлекса, толщиной 200 мкм, имеющего трехслойную структуру (полиимидная пленка, стеклоткань, полиимидная пленка), практически во всех случаях развитие разряда наблюдается на границе раздела слоев [5]. Можно отметить, что при значениях приложенного напряжения равного 26 кВ, наблюдается значительное различие времени развития пробоя образцов в исходном состоянии и образцов с наведенным электретным зарядом. Причем, следует отметить, что величина объемного заряда также оказывает влияние на время до пробоя. Как видно из таблицы 1, чем выше значение наведенного электретного заряда, тем меньше время развития разряда. С ростом приложенного напряжения влияние величины объемного заряда уменьшается. Из приведенных результатов времени до пробоя при различных значениях объемного заряда видно, что образцы с зарядом имеют меньшее время развития разряда, однако величина объемного заряда не оказывает существенного влияния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Почивалова А.В. Исследование разряда на границе раздела твердых диэлектриков. ВКР – Томск, 2006. – 126 с.
2. Сажин Б.И., Лобанов А.М., Романовская О.С. и др. Электрические свойства полимеров. Под ред. Б.И. Сажина. – Л.: Химия, 1986. – 224 с., ил.
3. Похолков Ю.П., Меркулов В.И., Петров А.В. Физика диэлектриков Лабораторный практикум. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 132 с.
4. Карпицкий О.В. Особенности развития разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков при длительном воздействии приложенного напряжения - Томск: ТПУ, 2010 - т. 1. - с. 60-64.
5. Электрофизические проблемы применения твердых и комбинированных диэлектриков в технике высоких напряжений. Изд-во «Наука». Сибирское отделение. Новосибирск, 1974.

#### ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ОБМОТОК

Супуева А.С., Бекк П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Опыт эксплуатации и многочисленные исследования не оставляют сомнений в том факте, что самым слабым с точки зрения надежности элементом низковольтной электрической машины является система изоляции. Согласно литературным данным, от 70% до 90% всех отказов происходят из-за пробоя межвитковой изоляции. Эксплуатационные перенапряжения не опасны для неповрежденной изоляции

низковольтных обмоток. Как правило, пробой происходит в том случае, если в изоляции имеются сквозные повреждения (дефекты).

Анализ условий производства и эксплуатации низковольтных электрических машин показывает: износ изоляции и образование дефектов происходит в результате сочетания воздействующих нагрузок (технологических и эксплуатационных), конструктивных параметров обмотки и совместимости компонентов системы изоляции (рис. 1).

Вопросами надежности систем изоляции низковольтных обмоток занимался ряд коллективов под руководством таких ученых как Гольдберг О.Д., Похолков Ю.П., Галушко А.И., Бернштейн Л.М. и др. В этих работах описаны критерии и механизмы отказа низковольтных обмоток, предложены способы испытаний электроизоляционных материалов и обмоточных проводов, разработаны математические модели и методы для определения и обеспечения показателей надежности.

В то же время, несмотря на большой научно-практический задел, существует ряд нерешенных проблем:

- существующие методы контроля качества обмоточных проводов не дают количественной оценки механической прочности изоляции, получаемые результаты условны и имеют большую погрешность;
- отсутствуют методы определения величины адгезии в системе межвитковой изоляции с последующей оценкой её влияния на процессы дефектообразования;
- нет точных рекомендаций по быстрому прогнозированию уровня надежности электроизоляционной системы обмоток в процессе эксплуатации.

В работе сделана попытка найти способ решения указанных задач.

В качестве объектов исследования выбраны современные эмалированные провода и пропиточные составы, применяющиеся при производстве низковольтных электрических машин.

При входном контроле эмалированных проводов предпочтительнее оценивать механические характеристики. Существующие методы определения электрических характеристик дают информацию лишь о величине пробивного напряжения изоляции провода [2]. На сегодняшний день основной вид испытаний для контролирования качества изоляции эмалированных проводов является метод оценки механической прочности по числу двойных ходов иглы по поверхности провода до окончания истирания изоляции образца [1]. Главными недостатками данного метода, является малая статистическая устойчивость данных, также невозможность получения информации о дефектности  $\lambda$  испытываемого образца и качестве изоляции на всей длине эмалированного провода. Метод испытаний дает очень большой разброс результатов в силу его высокой чувствительности к случайным колебаниям условий испытаний: разбросу по диаметру иглы, разбросу по диаметру жилы, аккуратности балансировки коромысла и т.д. Кроме того для проведения испытаний необходимо специфическое и технически сложно реализуемое оборудование.

В работе предлагается метод определения дефектности  $\lambda$  изоляции эмалированных проводов в электролите [4]. Определено качество изоляции эмалированного провода в состоянии поставки, затем после имитации технологических воздействий: растяжение, изгиб, воздействие растворителя и температуры (таблица №1,2). И на основе полученных результатов сделаны выводы о качестве изоляции эмалированного провода.

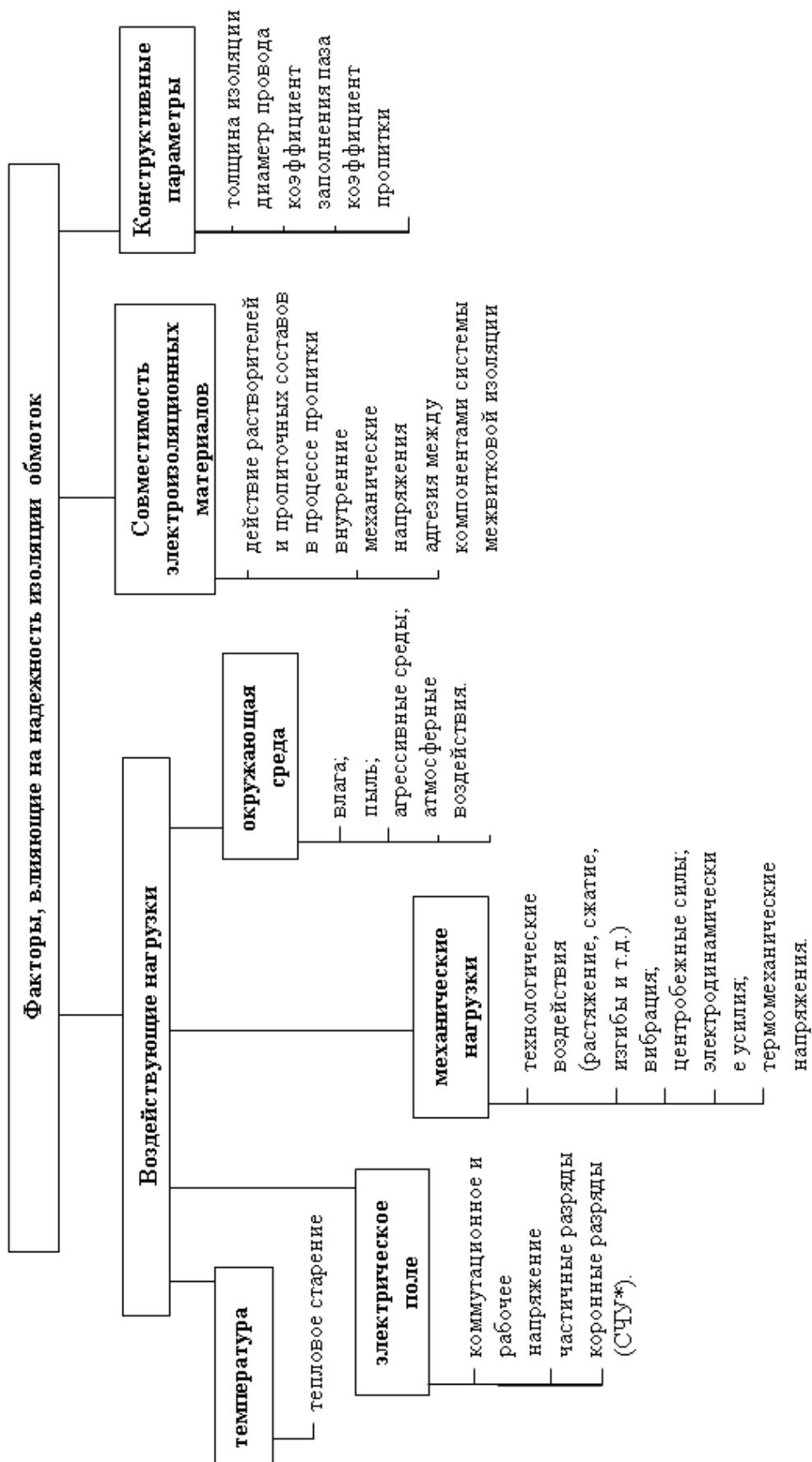


Рис. 1. Общая схема нагрузок и факторов, определяющих надежность изоляции обмоток.

**Таблица 1.** Результаты испытаний после имитации технологических воздействий (растяжение и изгиб)

Марка провода	Провод после имитации технологических воздействий							
	В состоянии поставки		3% растяжения		5% растяжения		7%растяжения	
	$q$	$\lambda, 1/мм$	$q$	$\lambda, 1/мм$	$q$	$\lambda, 1/мм$	$q$	$\lambda, 1/мм$
ПЭЭА-155	3	0,0001	3	0,0001	40	0,00133	450	0,115
ПЭТ-155	0	0	0	0	0	0	10	0,0004
ПЭТД-180	0	0	0	0	0	0	0	0

**Таблица 2.** Результаты испытаний после имитации технологических воздействий (растяжение, воздействие растворителя (ксилол) и температуры ( $T=60\text{°C}$ )).

Марка провода	Провод после имитации технологических воздействий							
	В состоянии поставки		3% растяжения		5% растяжения		7%растяжения	
	$q$	$\lambda, 1/мм$	$q$	$\lambda, 1/мм$	$q$	$\lambda, 1/мм$	$q$	$\lambda, 1/мм$
ПЭЭА-155	90	0,0036	104	0,0002	131	0,00524	190	0,0076
ПЭТ-155	0	0	3	0,00012	7	0,00028	13	0,00036
ПЭТД-180	4	0,00016	5	0,0002	8	0,00032	7	0,00028

Исследуемые провода показали хорошую механическую прочность изоляции, т.к. величина  $\lambda$  ниже 0,03, что обуславливает малую вероятность совпадения дефектов  $P_e$  и высокую надежность межвитковой изоляции.

Достоинства данного метода заключается в том, что он позволяет определить точное количество дефектов  $q$ , которые можно использовать для оценки вероятности сквозных повреждений [4]. Основные преимущества: простота методики, проведение испытаний не требует дорогостоящего оборудования.

Оценка технологической устойчивости изоляции дает информацию о качестве исследуемого эмалированного провода, но для создания надежной изоляции не достаточно исследовать обмоточный провод как таковой. Важно знать его технологические и эксплуатационные свойства в системе изоляции, так как свойства системы изоляции могут отличаться от свойств материалов, составляющих её.

Эксплуатационная надежность системы изоляции определяется, прежде всего, величиной адгезии между её компонентами. В случае высокой адгезии процессы разрушения изоляции и образование сквозных дефектов значительно ускоряются в связи с повышением вероятности развития трещин из пропиточного состава в эмалевую изоляцию [3].

К сожалению, существующие в настоящее время методы определения работы адгезии  $W_a$  полимерных пленок в большинстве случаев не применимы для систем межвитковой изоляции, в ряде случаев полученные результаты условны, при проведении измерений учитываются существенные допущения, значительно снижающие точность полученных результатов [3].

Решение проблемы определения величины  $W_a$  возможно путем расчета свободных поверхностных энергий пропиточного состава  $\gamma_L$ , эмалевой изоляции провода  $\gamma_S$  и их межфазной поверхностной энергии  $\gamma_{LS}$ , с последующим вычислением  $W_a$  [3]:

$$W_a = \gamma_L + \gamma_S - \gamma_{LS} \quad (1)$$

Свободные поверхностные энергии двух контактирующих полимерных материалов определяются главным образом дисперсионной  $\gamma^d$  и полярной  $\gamma^h$  составляющими:

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^h$$

Авторами Каган Д.Ф., Гуль В.Е. предложено определение  $\gamma_S$ ,  $\gamma_L$  из системы уравнений (2) и  $\gamma_{LS}$  из уравнения(3)

$$\begin{cases} \gamma_{\text{вода}} = 2\left(\sqrt{\gamma_{S(L)}^d \gamma_{L\sigma}^d} + \sqrt{\gamma_{S(L)}^h \gamma_{L\sigma}^h}\right) \\ \gamma_{\text{глиц}} = 2\left(\sqrt{\gamma_{S(L)}^d \gamma_{L\epsilon}^d} + \sqrt{\gamma_{S(L)}^h \gamma_{L\epsilon}^h}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma_{LS} = \gamma_L + \gamma_S - 2\sqrt{\gamma_{LS}^d \cdot \gamma_{SS}^d} + 2\sqrt{\gamma_{LS}^h \cdot \gamma_{SS}^h} \quad (3)$$

где,  $\gamma_{\text{вода}}$ ,  $\gamma_{\text{глиц}}$  – энергия смачивания воды и глицерина к компонентам системы межвитковой изоляции;  $\gamma_{L\sigma}^d$ ,  $\gamma_{L\epsilon}^d$ ,  $\gamma_{L\sigma}^h$ ,  $\gamma_{L\epsilon}^h$  – справочные данные дисперсионных и полярных составляющих свободных поверхностных энергий воды и глицерина [3].

Подставляя полученные результаты в уравнение 1, находим  $W_a$ .

Сопоставление величин  $W_a$  и скоростей дефектообразования для исследуемых систем межвитковой изоляции показало: с увеличением работы адгезии увеличивается скорость дефектообразования [3,4]. Это связано с увеличением вероятности развития сквозного дефекта в системе «пропиточный состав – эмалированный провод».

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

1. Определение технологической устойчивости эмалированных проводов в электролите позволяет получить полную информацию о качестве провода на всей длине и оценить стойкость изоляции к технологическим нагрузкам.

2. Целесообразность совместного использования компонентов межвитковой изоляции можно определять с учетом  $W_a$ . Это дает возможность прогнозировать скорость дефектообразования  $H_e$  в композициях «пропиточный состав – эмалированный провод».

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р МЭК 60851-3 – 2002. Провода обмоточные. Методы испытаний. Часть 3. Механические свойства.
2. ГОСТ Р МЭК 60851-5 – 2008. Провода обмоточные. Методы испытаний. Часть 5. Электрические свойства.
3. Леонов А.П., Супуева А.С. Определение работы адгезии в системе межвитковой изоляции // Науковедение. 2013. № 3. с. 1-5.
4. ОСТ 16.0800.821-88 «Определение дефектности эмалированных проводов в электролите и дроби».

## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛАССИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ELCUT

Асланян Р.О., Рапопорт О.Л.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В первых появившихся локомотивах основным элементом энергетической цепи был тяговый электродвигатель постоянного тока, благодаря электромеханической

характеристике, которая в наилучшей степени соответствует условиям тяги. Однако коллекторные тяговые электродвигатели имеют относительно невысокие показатели надежности, т.к. входят в число электрических машин, наиболее напряженных по коммутации, механической прочности и нагреву. В настоящее время во всем мире широко внедряется подвижной состав с бесколлекторными, преимущественно, тяговыми асинхронными электродвигателями (ТАД). Такие тяговые электроприводы позволяет заметно улучшить эксплуатационные характеристики силового электрооборудования локомотивов: позволяют снизить затраты на ремонт и обслуживание электродвигателей; асинхронный тяговый электродвигатель по сравнению с коллекторным имеет более высокое значение КПД.

Современные тенденции развития отечественных железных дорог так же направлены на оснащение тепловозов тяговыми приводами переменного тока. Это связано с основными достоинствами двигателей, такими как простота конструкции, отсутствие щеточно-коллекторного узла, что в сравнении с тяговыми двигателями постоянного тока открывает большие возможности для широкого использования. Высокая повреждаемость тяговых электродвигателей связана с пробоем изоляции. Изоляция играет важную роль в обеспечении надежной работы любого электрического устройства, в том числе и тяговых асинхронных двигателей. Изоляция тяговых двигателей подвергается значительному нагреву, воздействию влаги, и перенапряжений, вибрации. По вышеперечисленным причинам изоляция должна обладать достаточной электрической и механической прочностью, быть нагревоустойчивой и влагоустойчивой. Пробой изоляции является одной из основных проблем тяговых электродвигателей. Согласно исследованиям, с течением времени эксплуатации пробивное напряжение становится меньше из-за старения изоляции. Главной причиной старения является температура нагрева изоляции, как следствие тепловыделения в активной части машины при ее работе. Это проявляется как в тяговых двигателях постоянного, так и в тяговых двигателях переменного тока. Контроль температуры активной части в процессе эксплуатации тяговых электродвигателей является актуальным, так как позволит прогнозировать старение изоляции и предупреждать отказы.

В статье представлен расчет температуры нагрева асинхронного тягового электродвигателя (ТАД) двумя методами.

Первый метод является тепловой расчет по классической методике расчета. Для получения данных, необходимых для расчета температуры нагрева двигателя выполнен электромагнитный расчет тягового асинхронного двигателя. Расчет представлен на примере тягового двигателя переменного тока марки АД917УХЛ1.

#### **Структура условного обозначения ТАД – АД917УХЛ1:**

ТАД - тяговый асинхронный двигатель

Климатическое исполнение (У) и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

У — умеренный климат;

ХЛ — холодный климат;

1 — на открытом воздухе.

#### **Условия эксплуатации :**

Степень защиты IP54 по ГОСТ 17494-87.

Первая позиция — защита электродвигателей от проникновения посторонних предметов.

5 – пылезащищённое (некоторое количество пыли может проникать внутрь, однако это не нарушает работу устройства). Полная защита от контакта.



Вторая позиция — защита от проникновения жидкости. 4 - защита от брызг, падающих со всех сторон.

Способ монтажа: опорно - осевое подвешивание.

Способ охлаждения АС37:

А – воздух;

3- охлаждение с помощью отводящей и подводящей трубы;

7- способ перемещения хладагента.

Данный электродвигатель предназначен для использования как в маневровых тепловозах ТЭМ-21, так и в магистральных тепловозах 2ТЭ25А и ТЭ35А.

Исходными данными для расчета являются: номинальная мощность  $P_{2н} = 350$  кВт; номинальная частота вращения  $n_n = 347$  об/мин; максимальная частота вращения  $n_n = 2500$  об/мин; номинальное напряжение (линейное)  $U_n = 530$  В; число фаз ; число пар полюсов  $p = 6$ ; класс нагревостойкости Н; степень защиты IP54; охлаждение IC37; конструктивное исполнение IM9001.

В результате выполнения электромагнитного расчета тягового электродвигателя переменного тока были проведены следующие расчеты: расчет магнитной цепи; расчет индуктивных сопротивлений; определение токов высших гармонических и создаваемых ими потерь; построение круговой диаграммы; расчет характеристик электродвигателя

На основании данных электромагнитного расчета был выполнен тепловой расчет по классической методике [1]. В результате теплового расчета по классической методике температура нагрева составила:

$t_n = 112,37 + 40 = 152,37 = 152,37$  0С, при температуре окружающей среды  $t = 40$  0С.

Второй метод расчета температуры нагрева тягового электродвигателя переменного тока - моделирование в программной среде ELCUT. Используемый нами пакет ELCUT позволяет выполнять моделирование методом конечных элементов двухмерных электромагнитных, тепловых и механических полей.

Решение задачи на нагрев включает несколько последовательных шагов:

1. Выбор типа решаемой задачи.
2. Выбор класса задачи (плоская).
3. Создание геометрической модели (чертеж объекта).
4. Задание свойств материалов.
5. Задание граничных условий
6. Построение сетки конечных элементов.
7. Решение задачи.
8. Обработка результатов решения задачи

Для расчета температуры нагрева в программной среде составили алгоритм, представленный на рис. 1.

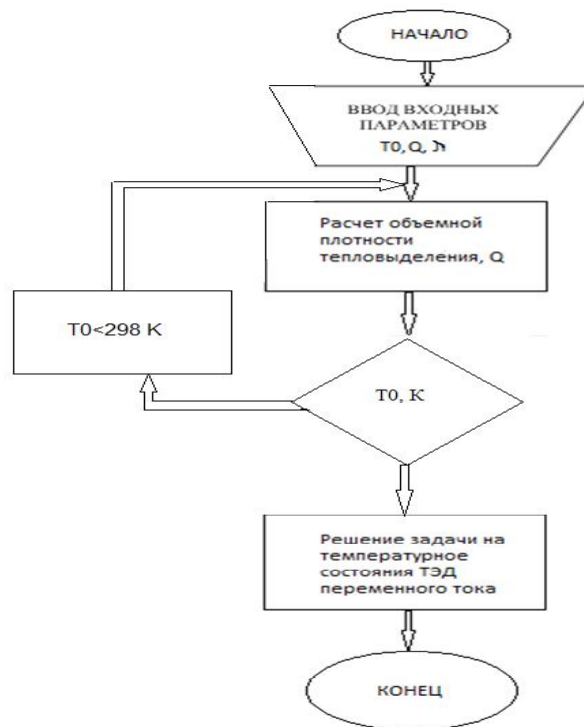


Рис. 1. Общий алгоритм расчета температурного поля ТАД

В результате решения тепловой задачи была получена картина установившегося теплового состояния тягового электродвигателя для номинальных параметров работы. На рис.2 показана модель одной четвертой части двигателя в ELCUT.

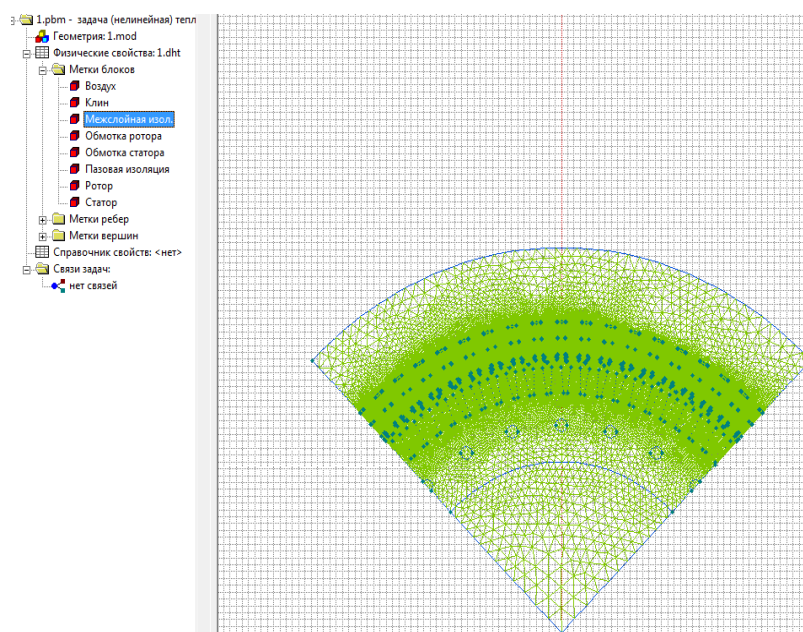
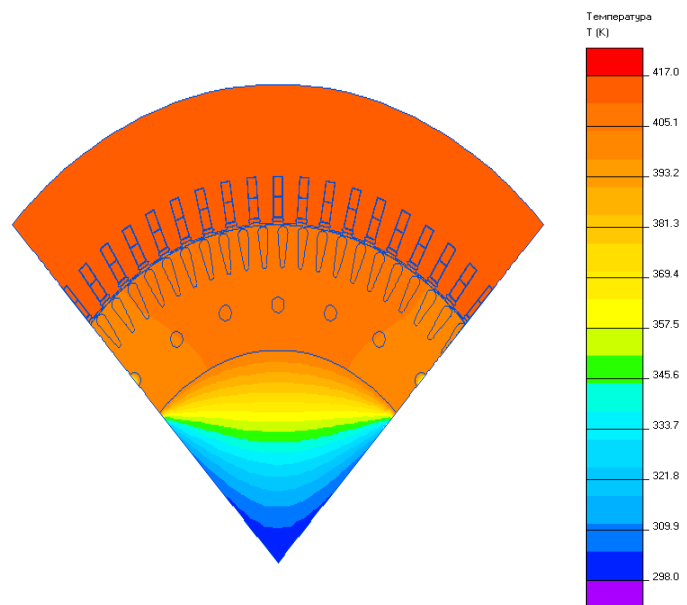


Рис. 2. Модель четверти двигателя

В результате решения задачи на распределение температуры в двигателе, получили температурную картину поля тягового двигателя, представленную на рис.3. Температура нагрева обмотки статора двигателя по данным моделирования в программе ELCUT составила 417 K, что составляет 144<sup>0</sup>С.



**Рис. 3.** Температурная картина поля тягового двигателя

Результатом проведенных расчетов стало определение температуры нагрева тягового асинхронного двигателя. При расчете по классической методике, температура нагрева составила  $152.37^{\circ}\text{C}$ . Что же касается моделирования теплового состояния в программной среде ELCUT, то температура нагрева получилась равной  $144^{\circ}\text{C}$ . Разность полученных результатов относительно друг друга составляет не более 5%. Так же можно сделать вывод о достоинствах и недостатках применяемых методов расчета температуры.

ELCUT может выполнять линейный и нелинейный стационарный температурный анализ в плоской и осесимметричной постановке. Сильной стороной ELCUT является необычно высокая скорость решения задачи, что по сравнению с классическим методом позволяет сократить время расчета. ELCUT предоставляет богатый набор инструментов для просмотра и анализа результатов решения. Для изображения картины поля применяется цветовая заливка, линии равного уровня, поле векторов. Также следует отметить, что достоинством данного метода является возможность получения полной картины температурного поля электродвигателя. ELCUT позволяет рассматривать локальные значения температуры нагрева.

Классический метод расчета, как и метод, посредством моделирования в программной среде имеет свои плюсы и минусы. Достоинством является точность полученных результатов. К недостаткам относятся, увеличение времени расчета температуры, а так же отсутствие полной картины температурного поля двигателя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование тяговых электрических машин.: Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. М.Д. Находкина. - М.: Транспорт, 1967. – 536 с.
2. Алексеев А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. - Л.: Энергия, 1977. - 445 с.
3. Проектирование электрических машин; Учеб. Пособие для вузов/ И.П.Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клюков и др.; Под ред. И.П. Копылова М.; Энергия, 1980.- 496 с.,илл.
4. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. Высшая школа, 1989. – 239

## PLASMA DYNAMIC SYNTHESIS OF YTTRIUM-BARIUM CUPRATES FOR HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

Stepanov K.I., Ivashutenko A.S.

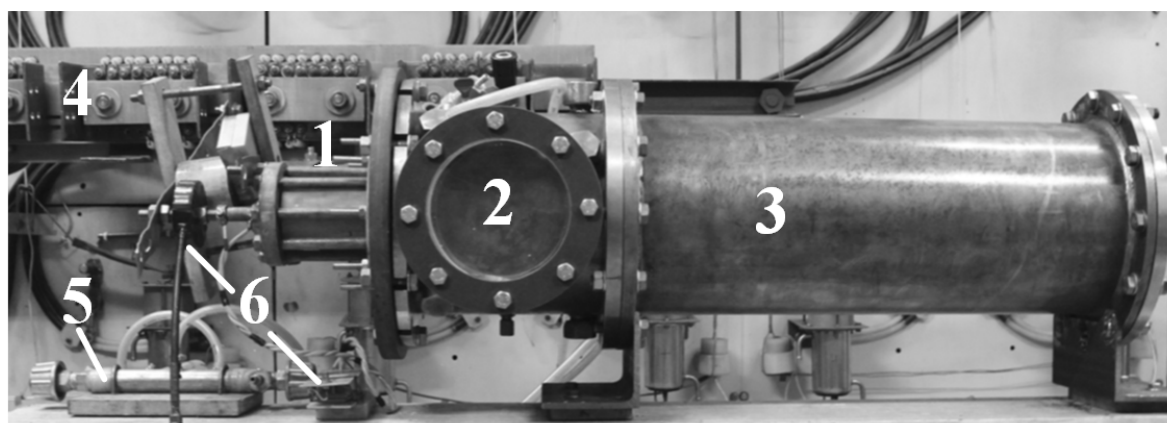
National research Tomsk polytechnic university, Tomsk

In the modern world there is a necessity in use of a large number of the electric power. There are two ways of the solution of this problem: directly increasing the number of generating capacities due to the construction of new power plants, or the transition to superconducting modules [1]. Both ways take place to be, nevertheless, the second way is the most perspective. However, it rests against a creation problem the high-temperature superconductors. Many research and production collectives are engaged in the solution of this problem, including the laboratory of high-temperature superconductivity (HTSC) ENIN TPU.

The new approach connected with application of high-intensity influences is developed in HTSC laboratory (digit plasma, magnetic-pulse pressing, dispergating of powders). The main aim of the laboratory is the development of material synthesis technology, capable to show the superconducting properties at normal conditions. Such a way, the main task of this work is the development of such material synthesis technology which will allow to obtain the product with superconducting properties at enhanced temperatures [2]. The most perspective way in this direction is the obtaining of yttrium - barium cuprates.

In this work the way of the plasma dynamic synthesis of charge mixture for high-temperature superconductors is developed with the use of the coaxial magnetoplasma accelerator of professor Sivkov [3]. The essence of a method consists in the following: initial components of charge mixture (barium hydroxide ( $Ba(OH)_2$ ) and yttrium nitrate ( $Y(NO_3)_3$ )) are loaded into the plasma formation zone of the accelerator where the discharge is burned and formed plasma flow. Copper oxide ( $CuO$ ) turns out to be as the result of electric copper conductors explosion, and as an additional result of the pure copper erosion from the walls of a copper acceleration channel (AC). Accumulated cooper is oxidized to copper oxide. At the plasma flow development, the specified particles are dispergated due to colliding with camera walls. The necessary composition of charge mixture and the particle sizes are selected at separation of the obtained powder.

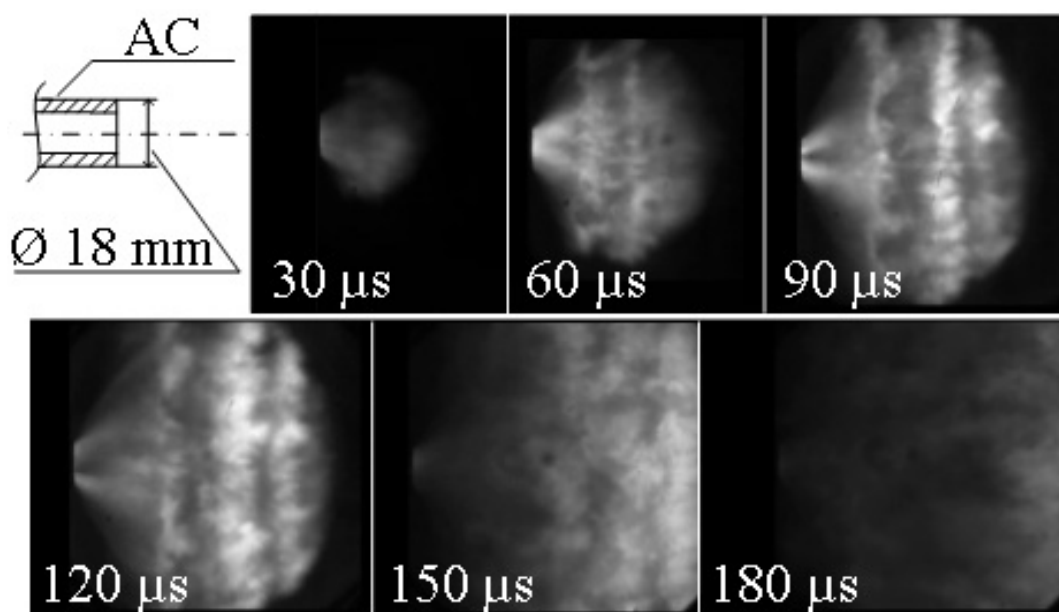
The setup (figure 1) is presented in the form of the cylindrical pipe divided into two cameras: the registering camera and the working camera. In the registering camera there is a window through which by using the superhigh-frequency camera (Photron FASTCAM SA1.1) the registration of the process into the chamber is carried out.



**Fig. 1.** Experimental setup: 1) CMPA; 2) registering chamber; 3) working chamber; 4) copper buses; 5) gas system; 6) equipment for registration of electrical parameters

The main element of the construction is a coaxial magnetoplasma accelerator (CMPA) which is placed on a flange of the registering camera. The CMPA consists of a typical Z-pinch-type accelerator and the external inductive system. The Z-pinch-type accelerator is the combination of the copper acceleration channel, the copper central electrode and the fiber-glass insulator. The central electrode and the fiber-glass insulator form the plasma formation zone. Initial powdered precursors (charge mixture) are placed in the plasma formation zone before the experiment and during the plasma burning they are involved in the plasma flow motion. Also in the plasma formation zone between central electrode and the AC copper wires are stretched to create the current channel.

The working cycle is the following: at the first moment power keys close and the pulse current starts to flow through the central electrode. After achieving by the increasing current  $i(t)$  of some level, fusible copper wires blow up, with the formation of the heavy-current arc discharge (initial plasma). Then the plasma of the heavy-current discharge is compressed by magnetic field of external inductive system, and takes the extended form. The parts of yttrium and barium, loaded into the plasma formation zone and the erosion products, are converted into an ionic state and involved in the plasma flow movement. The final product of reaction under the pressure exits form the AC in the registering chamber, and then in the working camera. The photogram of plasma flow movement in the registering chamber is shown in figure 2. The drawing of the AC edge is given in the top left image to explain whence the plasma flow begins.



**Fig. 2.** The photogram of the plasma flow movement in the registering chamber with indication of time intervals from the start of the synthesis process

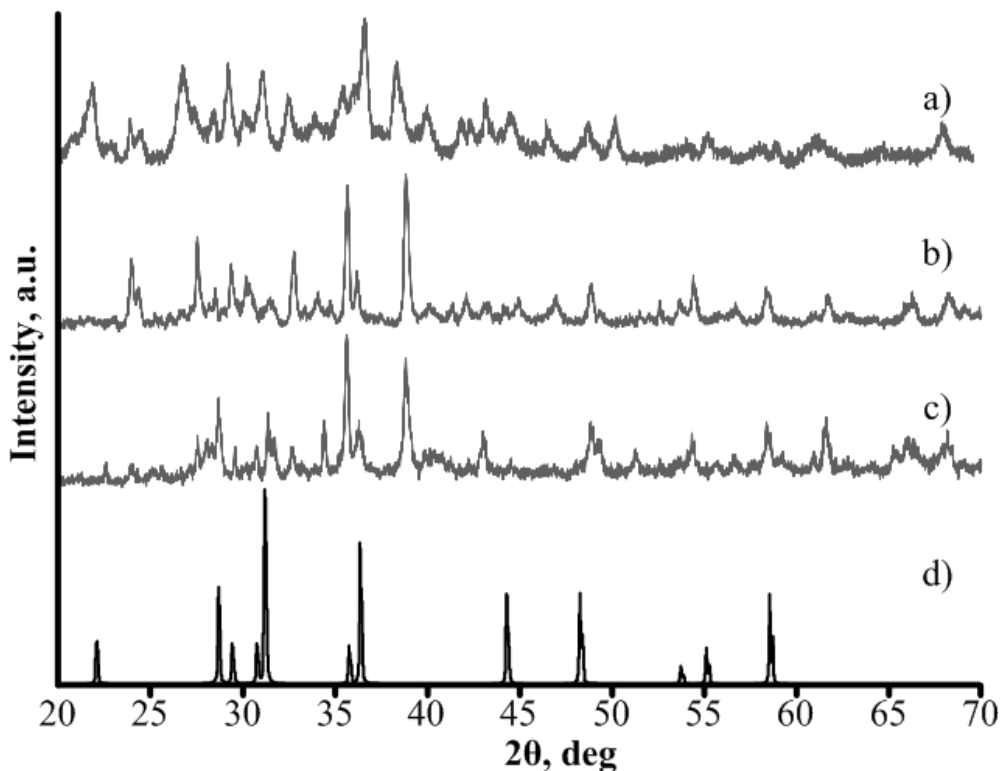
Figure 2 shows the dynamic of the plasma flow development directly in the registering camera filled with air atmosphere at normal conditions. The plasma contains particles of precursors, copper and copper oxide. Particles are accelerated in a plasma flow. At interaction of oxide particles with camera walls an intensive dispergating of the particles is started. It is promoted by a high temperature created in the plasma flow. This process leads to a more intensive destruction of large particles. After achieving by the plasma flow a camera back wall there is a reflected wave providing a bigger high uniformity of the powder. The working process duration is about 500 microseconds. The dispersion of powdered oxide

particles were defined with the electronic microscopy. The average size of particles about 200 nanometers is obtained.

The analysis of the obtained phases and the structure of the synthesized powder was carried out on the X-ray diffractometer Shimadzu XRD 7000S (CuK $\alpha$ - radiation). The obtained XRD patterns of synthesized product, the product after annealing, the product after sintering and the peaks position for yttrium-barium cuprates reference are presented in figure 3.

The XRD pattern for the synthesized product consists of many reflexes that can be attributed to initial components of charge mixture and copper particles. No matches with the reference pattern have been found. To exclude different impurities from initial precursors that can be in the final product the annealing of the final product at a temperature of 850°C with the subsequent endurance within an hour has been carried out. This process, in particular, is necessary for the decomposition of difficult barium and yttrium compounds. The following effects were observed as a result of XRD analysis: instead of reflexes attributed to barium hydroxide, there were reflexes that is similar with barium oxide.

To obtain the ceramics sample from the powder after annealing the magnetic-pulse pressing were carried out. After this, the sample has been sintered at a temperature of 960 °C within six hours with controlled cooling of 100 °C/h. The XRD pattern of the ready ceramics sample is also shown in figure 3. The obtained pattern is similar to the reference data for tetra phase of yttrium - barium cuprate, but comparing the received X-ray diffraction with any certain standard wouldn't be true since the base presented in the Search-Match program is very wide and various. It is possible to add that our picture has divergences on the reflexes intensity. It is the result of that the technology is at a development stage and optimal modes only are selected.



**Fig. 3.** XRD patterns: a) the synthesized product; b) the product after annealing; c) the ceramic sample after sintering; d) the yttrium-barium cuprates reference

In addition, at the final product there is a quantity of alien impurity leading to an increase in a temperature interval of a sample transition in a superconducting state as a result [5]. It should be noted that with the temperature approach to an absolute zero, the sample resistance will "aspire" to the residual resistance which, in turn, depends on the structure of initial precursors and perfection of the final product.

That's why in the second series of experiments the yttrium nitrate annealing with the controlled temperature increasing (no more than 4 °C/min.) to 420 °C, with the subsequent endurance within 40 minutes was carried out. As a result of a heat treatment the pure Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide was obtained. Thus the initial precursors of a charge mixture without impurities were received.

As a result of this work it is possible to make the following conclusions:

1. The rapid single-stage process of powdered charge mixture synthesis with the duration of no more than 500 microseconds were developed.
2. The obtained ceramic has nanocrystalline structure that finally can significantly effect on the sample transition temperature in a superconducting state.
3. The ceramic is characterized by crystalline phases which are typical for the reference phases of yttrium - barium cuprates.
4. Reducing a temperature transition interval and decreasing a superconductor residual resistance, it is necessary to the make preliminary annealing of initial components, for the "parasitic" impurity elimination.
5. The possibility of material synthesis and production of high-temperature superconductors ceramics based on yttrium-barium cuprates with the use of high-intensity technologies is shown.

#### REFERENCES

1. De Gen P.// Superconductivity of metals and alloys. M:ITS Media, 2012.
2. Ginzburg V.// The Nobel lectures on physics. Stockholm, 2003.
3. Patent №137443, RF, Coaxial magnetoplasma accelerator, 2013.
4. Ivashutenko A.// the Zirconium-corundum nanoceramics received with the use of high-intensity streams energy, 2010.
5. Ginzburg V.// Superconductivity. Alpha M, 2006.

## СЕКЦИЯ 2. ЭФФЕКТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ДОЗ ФЛИКЕРА В МОДЕЛЯХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Ненахов А.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

При моделировании процессов в системах электроснабжения часто возникает задача вычисления показателей качества электроэнергии. Наиболее трудным для вычисления из них является доза фликера.

Наибольшую сложность вызывает блок статистического анализа дозы фликера, завершающий весь расчет. Ранее этот блок был реализован отдельной программой, которая производила обработку сразу всех полученных данных уже после расчета в модели. В настоящее время работа с ним затруднена в связи с изменением форматов данных в моделях. Помимо этого в действующем стандарте указано, что статический анализ должен производиться в реальном времени. Этот подход наиболее удобен в работе при необходимости обработки большого количества данных. Таким образом, появилась задача переработки данного блока с использованием возможностей среды Simulink пакета MatLab.

Согласно [1], статический анализ основывается на разбиении амплитуды сигнала, характеризующего мгновенное значение фликера, на определенное число классов. В нашем случае, для того чтобы модель была более универсальна и проста величина амплитуды входного сигнала была ограничена значением 10 ед. И исходя из этой величины выбиралось количество классов.

Далее мгновенное значение фликера сравнивается со значением каждого из классов и при достижении определенного уровня для соответствующего класса счетчик добавляет единицу к имеющемуся числу. В результате должна получиться функция распределения уровней фликера по классам. Суммируя показания счетчиков всех классов и выражая показания счетчика каждого из них по отношению к общей сумме, должны получаться функции плотности вероятности уровня фликера. Из этой функции затем получают интегральную функцию вероятности, которая и используется при конечном анализе «время-уровень фликера». Так описываются данные вычисления в ГОСТе.

Однако, модель была построена по более простому принципу основанному на определении из того же документа. Для расчета дозы фликера необходимо вычислить перцентили – уровни фликера, значения которых были превышены в течение заданного процента времени за интервал наблюдения.

В качестве примера рассмотрим расчет величины  $P_{50}$  – перцентили для 50% времени. Вычисление представлено в виде блок-схемы на рисунке 1.

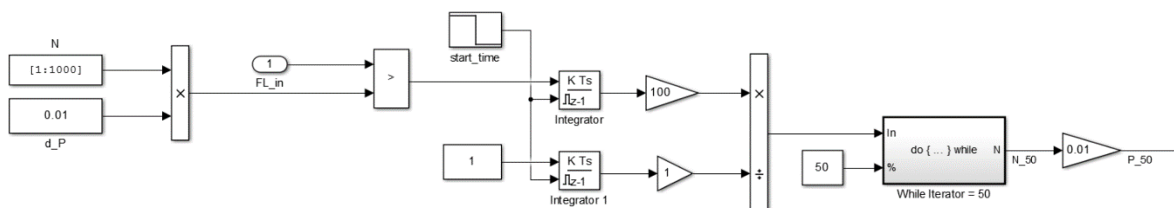


Рис. 1. Блок-схема вычисления уровня фликера, превышаемого в течении 50% процентов времени наблюдения



Входными данными является набор уровней фликера, представленный как произведение набора номеров от 1 до 1000 на разницу между уровнями, в данном случае равную 0.01 ед. Сравнение производится простой логической операцией, в результате чего в те моменты, когда входной сигнал превышает значение заданного уровня, в данном канале выводится логическая единица, а в противном случае ноль.

Функцию счетчиков здесь выполняют дискретные интеграторы. Опять же для каждого канала интегратор ведет счет в том случае если на вход поступает единица. Таким образом отсчитывает время в течении которого величина фликера превышает выбранный уровень. Второй блок интегратора ведет счет полного времени измерения, так как на его вход постоянно подана единица. Оба блока имеют дополнительный вход для сброса. Сигнал на него подается в момент начала измерения. Это позволяет задать периодичность для расчета кратковременных доз фликера. Далее, деля время превышения на полное время и умножая на 100, получаем процентное соотношение.

Следующим шагом является выбор из всех изначально заданных уровней того, в котором полученная величина превышает указанное количество процентов (в нашем примере 50%) и находится максимально близко в этому значению. Это осуществляется с помощью специального блока-подсистемы, реализующего цикл «while». На каждом шаге расчета в данном блоке производится последовательный перебор чисел (номеров уровней) до тех пор, пока не выполнится заданное условие. Условие формируется внутри блока, а на выход подается номер первого канала для которого оно выполнено.

Таким образом, умножая этот номер на величину разницы между каналами и получаем искомое значение перцентиля  $P_{50}$ . Так как, в блоке цикла производится множество операций на одном шаге частота расчетов здесь выбрана значительно ниже чем при вычислении времён. В принципе, она может быть выбрана из периода расчета кратковременной дозы фликера, который по требованиям составляет от 1 до 15 минут.

Выбор правильного периода так же имеет значение, так как для конечного вычисления дозы требуется определить множество перцентилей для величин от 0.1 до 80 %, и на это может потребоваться значительная производительность системы. Всего используется 15 различных уровней, поэтому в полной схеме содержится такое же количество блоков расчета цикла.

После этого доза фликера вычисляется простыми математическими операциями по формуле указанной в [1].

Правильность этих вычислений проверялась на соответствие требованиям в комплексе с остальными блоками фликерметра. Проверка осуществлялась подачей на вход синусоидальных сигналов с модуляцией разных частот, которая и формирует колебания. Частота и амплитуда модуляций заданы стандартом таким образом, что фликерметр на выходе должен давать значение в 1 ед. Часть результатов проверок модели для разных частот и форм колебаний представлены в таблице 1. В данном случае каждый замер проводился в течении 30 сек.

**Таблица 1.** Значения измерений нормированных уровней фликера в модели

Частота колебаний	Форма колебаний	Амплитуда колебаний $\Delta U/U$	Выходное значение фликера
3,5	меандр	0,342	0,9881
8,8	меандр	0,196	1,007
22,0	меандр	0,611	1,005
3,5	синус	0,564	0,9754
8,8	синус	0,250	1,006
22,0	синус	0,826	1,012

Проверка показала, что на большом диапазоне частот колебаний погрешность вычислений в модели при заданном количестве уровней не превышает 1%. Точность несколько снижается при низких частотах колебаний, но это обусловлено работой одного из четырех других блоков фликерметра. Также можно заметить, что конечная точность зависит также и от времени измерения, и так как время замеров должно быть не менее 1 минуты фактическая погрешность будет еще ниже.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 51317.4.15-2012 Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования // М: «Стандартинформ», 2012. – 75 с.

### **ОЦЕНКА СТЕПЕНИ РИСКА ПРИ АВАРИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ПРИЧИНЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ**

Бархатов А.Ф., Зайковская А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Трубопроводный транспорт является самым дешевым видом транспорта жидких и газообразных углеводородов. Для их доставки по территории РФ и за рубеж в нашей стране построена протяженная сеть (166 тыс. км [1]) магистральных газопроводов (МГ) и 52,5 тыс. км [1] магистральных нефтепроводов (МН), но на сегодняшний день значительная часть магистральных трубопроводов (МТ) перешагнула нормативный срок службы в 30 лет. Так 10 % российских газопроводов эксплуатируется до 10 лет, 26 % – от 10 до 20 лет, 36 % – от 21 до 30 лет, 28 % – более 30 лет [2]. Около 40 % МН эксплуатируется более 33 лет [3].

Обеспечение надежности эксплуатации систем трубопроводного транспорта РФ является приоритетной и сложной задачей, так как аварийные разрушения влекут за собой значительный экологический, экономический ущерб, так убытки от одной аварии МГ по причине коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) или стресс-коррозии могут достигать 100 млн р. [4] с возможными человеческими жертвами. На сегодняшний день основной причиной разрывов газовых магистралей является наличие недопустимых для дальнейшей эксплуатации трещин КРН на внешней поверхности МГ, которые представляют серьезную опасность, потому что при авариях они лавинообразно распространяются по поверхности трубопровода, и происходит аварийный разрыв, что может вызвать повреждение приводов кранов, и перемычки других газопроводов целого коридора [5]. МН также подвержены аварийности по причине КРН. Первая авария по причине КРН произошла в 2002 г. на МН Нижневартовск – Курган – Куйбышев диаметром 1220 мм [6]. При возникновении пожара в случае аварийного разрыва МГ продукты горения загрязняют воздушную среду и представляют угрозу здоровья человека [7].

На сегодняшний день достоверно спрогнозировать динамику развития дефектов КРН является очень сложной и порой не выполнимой задачей. Для идентификации дефектов КРН используют внутритрубную дефектоскопию, так в 2009 г. объем дефектоскопии МГ составил 17,7 тыс. км, объем капитального ремонта – 2,383 тыс. км [8], но, тем не менее, аварии на МГ случаются.

В настоящий момент оценка степени риска и прогнозирование возможных последствий аварий на МГ подверженных КРН является важной и актуальной проблемой.

Развитие трещин КРН происходит в семь стадий: 1 – отслаивание изоляционного покрытия; 2 – адсорбция водорода ( $H_{2,адс}$ ) на поверхность трубопровода при этом происходит снижение поверхностной энергии (эффект Ребиндера); 3 – абсорбция водорода сталью газопровода, 4 – молизация водорода и зарождение микротрещин КРН вдоль нижней образующей трубы, 5 – развитие микротрещин и образование стресс-коррозионных трещин, 6 – сращивание мелких трещин и образование одной магистральной трещины, 7 – механический долом в плоскости действия максимальных касательных напряжений под углом примерно в  $45^0$ , что приводит к разрушению газопровода с последующим выходом транспортируемого продукта на поверхность и разлету фрагментов газопровода.

Экологический риск на предприятиях трубопроводного транспорта нефти и природного газа – это вероятность наступления катастрофического (аварийного) события [12]. Процедура оценки рисков на МГ включает в себя: идентификацию рисков, анализ рисков и оценку рисков. В рамках данной работы этапы идентификация рисков и анализ рисков пропущены, так как рассматриваются события наступления аварийного разрыва МГ и МН на полное сечение по причине КРН. На сегодняшний день согласно отчетов Ростехнадзора доля аварий по причине КРН на МГ составляет более 50 % [1], на МН аварийность по причине КРН ничтожно мала, но, тем не менее, аварии случаются [6]. Приоритетность в развитии КРН на МГ связана с более высокими давлениями транспортируемого продукта поддерживаемого в газопроводах. Оценка риска аварий на линейной части МГ, включает в себя оценку частоты возникновения аварий, оценку возможного ущерба, индивидуальные и коллективные риски для персонала и населения [13].

Существует несколько различий в определении понятия авария в зависимости от базы данных по аварийности (UKOPA, NEB, CONCAWE, PHMSA, Ростехнадзор). В данной работе будут, рассматриваться следующие понятия аварии. Для МГ авария – повреждение или разрушение участка газопровода с объемом утечки более  $10\ 000\ м^3$  сопровождающаяся воспламенением или взрывом газа. Авария на МН [13] – внезапный вылив или истечение нефти в результате полного разрушения или частичного повреждения МН, которые сопровождаются одним или несколькими из следующих событий: воспламенение нефти, загрязнение рек, водоемов и водотоков сверх пределов, установленных стандартом на качество воды, утечки нефти объемом  $10\ м^3$  и более.

#### **Частота возникновения аварий**

Частота возникновения аварий для МГ выражается в интенсивности (1/км) возникновения аварийных разрывов МГ. Для МН данный показатель определить не представляется возможным так как отсутствуют сведения о удельном весе аварий по причине КРН в общем количестве аварий. Для МГ интенсивность возникновения аварийных разрывов определяется:

$$\lambda_{\text{а}} = \lambda \cdot K \cdot P, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – интенсивность возникновения аварий на МГ, 1/км;  $K$  – удельный вес аварий по причине КРН – 0,5 [1];  $P$  – вероятность возгорания газа при аварийном разрыва, при диаметре условного прохода 1400 – 0,72, 1200 – 0,74, 1000 – 0,6 [14].

Интенсивность возникновения аварий на 1000 км МГ, интенсивность возникновения аварий на МГ по причине КРН (с учетом того, что каждая вторая авария связана с КРН) и протяженность МГ с 2004 – 2009 гг. представлены в табл. 1. Интенсивность

возникновения аварийных разрывов МГ с последующим возгоранием для различных диаметров газопроводов по годам представлена в табл. 2.

**Таблица 1.** Статистика аварий на магистральных газопроводах с 2004 – 2009 гг.

Годы	Протяженность тыс. км, МГ [1]	Интенсивность возникновения аварий [1]		Интенсивность возникновения аварий по причине КРН на 1000 км
		Общее число	На 1000 км	
2004	161,6	29	0,18	0,09
2005	161,6	19	0,12	0,06
2006	161,1	21	0,13	0,065
2007	166,002	16	0,10	0,05
2008	166,002	21	0,13	0,065
2009	166	16	0,10	0,05

**Таблица 2.** Интенсивность возникновения аварийных разрывов МГ с последующим возгоранием для различных диаметров газопроводов по годам

Годы	Диаметр, мм		
	1400	1200	1000
2004	0,0648	0,0666	0,054
2005	0,0432	0,0444	0,036
2006	0,0468	0,0481	0,039
2007	0,036	0,037	0,03
2008	0,0468	0,0481	0,039
2009	0,036	0,037	0,03

### **Оценка возможного ущерба при авариях на магистральных трубопроводах**

Оценка возможного экологического ущерба процесса транспортировки природного газа и нефти, проводится при рассмотрении гипотетических аварий с разрывом на полное сечение по причине развития недопустимых дефектов КРН с несколькими сценариями развития при различных технологических параметрах трубопроводов. Зоны действия поражающих факторов при разрыве трубопровода на полное сечение зависят от рабочего давления, характеристик транспортируемого продукта, времени срабатывания запорной арматуры, расстояния между запорной арматурой и т.д.

Для определения возможных сценариев возникновения и развития аварийных ситуаций на МГ используется метод логических деревьев событий. Анализ дерева событий представляет собой «осмысленный наперед» процесс, т.е. процесс, при котором исследование развития аварийной ситуации начинается с исходного события с рассмотрением цепи последующих событий, приводящих к возникновению аварии [13].

### **Оценка возможного экологического ущерба при авариях на магистральных газопроводах**

Наиболее опасные последствия при аварийных выбросах природного газа из МГ: воздействие ударной волны при взрыве газа в атмосферу, тепловое излучение при возгорании и токсичное влияние на человека. Так зона поражения окружающей среды при воспламенении может достигать до 500 м [12]. Зоны действия поражающих факторов зависят от диаметра трубопровода, давления, времени срабатывания запорной арматуры, расстояния между отсекающими кранами. Для оценки максимальной возможной опасности необходимо смоделировать разрыв МГ на полное сечение.

Согласно [14] при разгерметизации газопровода происходят следующие события:

- разрыв газопровода без воспламенения газа, истекающего в виде свободной (ых) струи(й) из концов разрушенного МГ или шлейфа из грунтового котлована.

Поражающие факторы: разлет осколков, воздушная волна сжатия, скоростной напор струи газа, загазованность;

- разрыв газопровода с воспламенением газа и образованием струевых пламен или колонного пожара в грунтовом котловане. Поражающие факторы: разлет осколков, воздушная волна сжатия, скоростной напор струи газа, прямое воздействие пламени, тепловое излучение.

При разрыве МГ истечение газа рассматривается отдельно с разделением на два аварийных потока газа из двух концов разрушенного газопровода: верхний и нижний (относительно точки разрыва МГ по доаварийному потоку газа: верхний – от нагнетающей КС до точки разрыва, нижний – от точки разрыва до принимающей КС) [14]. При этом, в качестве основных, влияющих на интенсивность истечения, параметров следует учитывать: внутренний диаметр МГ, рабочее давление, местоположение точки разрыва и время, требуемое для закрытия линейных кранов, предназначенных для отсечения аварийных участков МГ либо автоматически (минимальное время отсечения), либо с помощью средств дистанционного управления (время отсечения зависит от алгоритма идентификации факта аварии и реакции диспетчера), либо с участием персонала вручную по месту расположения кранов.

Для оценки степени риска авария на МГ по причине КРН рассматривается как разрыв газопровода на полное сечение с двумя возможными событиями: с возгоранием газа и без возгорания газа в окружающую природную среду.

Таким образом, на основании проведенных исследований описана последовательность развития трещин коррозионного растрескивания под напряжением на магистральных трубопроводах. Проведена оценка максимально возможных рисков эксплуатации МГ с дефектами стресс-коррозии. Проведен расчет: размеров зон потенциального поражения людей и зданий при авариях с гильотинным разрывом нефтепроводов и газопроводов. Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что в результате наступления аварийного разрыва магистрального трубопровода по причине стресс-коррозии в радиусе 500 м от места аварии возможно смертельное травмирование обслуживающего персонала. Учитывая ту опасность, которую таят в себе трещины КРН не попадающие в диапазон чувствительности современных дефектоскопов, то идентификация таких трещин должна стать одной из приоритетных задач предприятий трубопроводного транспорта РФ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Объекты магистрального трубопроводного транспорта и подземного хранения газа // Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2009 году. 2011. URL: [http://www.gosnadzor.ru/files/4c44310ca3066\\_Gosdoklad\\_2009.pdf](http://www.gosnadzor.ru/files/4c44310ca3066_Gosdoklad_2009.pdf) (дата обращения 20.08.2014).
2. Аксютин О.Е. Повышение надежности функционирования газотранспортной системы ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2010. – № 3. – С. 22–25.
3. Захаров М.Н., Саркисов А.С. Коммерческая эффективность диагностики технического состояния систем МГ // Газовая промышленность. – 2006. – № 2. – С. 62–65.
4. Повышение безопасности эксплуатации газопроводов и интеллектуальная система управления линейными кранами магистрального газопровода при авариях // Ростехнадзор Наше регион 2011. URL: <http://www.energopress.ru/allmaterials/1123/> (дата обращения 01.08.2014).

5. Варламов Д.П., Матвиенко А.Ф. Мониторинг стресс-коррозионной дефектности протяженной многониточной системы магистральных газопроводов по результатам многократной внутритрубной дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2010. – № 12. – С. 32–38.
6. Гумеров К.М., Гулятьдинов А.А., Черкасов Н.М., Кудакеев С.М., Абдульманов А.М., Мокроусов С.Н. Стресс-коррозия – один из источников опасности на высоконагруженных подземных стальных трубопроводах, изолированных пленочными материалами // Нефтепромысловое дело. – 2005. – № 4. – С. 42–46.
7. Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Аварийные выбросы природного газа: проблемы и пути их решения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 8. – С. 4–11.
8. Алимов С.В. Обеспечение надежности функционирования объектов Единой системы газоснабжения (ЕСГ) // Коррозия Территория Нефтегаз. – 2010. – № 11. – С. 4–7.
9. Сунагатов М.Ф. Стресс-коррозия магистральных газопроводов // Информационно-аналитический центр “Экспертиза промышленной безопасности”. 2011. URL: <http://www.safeprom.ru/articles/detail.php?ID=15248> (дата обращения 20.08.2014).
10. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. – М.: Елима, 2004. – 703 с.
11. Александров Ю.В., Юшманов В.Н. Анализ методов предотвращения разрушения газопроводов по причине КРН // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2011. – № 3. – С. 2–5.
12. Арзамасова Г.С., Карманов В.В., Бурдюгов С.И., Халтурин В.Г. Экологические риски процессов транспортировки газа по магистральным газопроводам // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 6. – С. 6–9.
13. Стадников М.А. Анализ возможных сценариев развития аварийных ситуаций на линейной части магистрального нефтепровода // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 11. – С. 36–39.
14. СТО Газпром 2-2.3-351-2009 Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЗА РУБЕЖОМ И В РОССИИ**

Ковальчук С.С., Денисова М.А., Ковальковская Н.О.  
Омский государственный технический университет, г. Омск

Энергетические затраты в сельхоз производстве принято разделять на прямые и косвенные. Учитываемые совместно, они представляют совокупные энергозатраты СХП. Оценка косвенных энергозатрат весьма полезна, поскольку дает возможность не только определять эффективность использования соответствующих материально-технических ресурсов, но и анализировать межотраслевые пропорции в энергопотреблении, при полном учете составляющих элементов в дальнейшем проводить альтернативный (стоимостному) анализ эффективности СХП. Однако полный учет составляющих косвенных энергетических затрат в силу статистических ограничений затруднен. Можно выделить репрезентативные виды косвенных энергозатрат и вести анализ, учитывая только их. Исследования показывают, что к репрезентативным видам косвенных энергозатрат относятся минеральные удобрения.

Коэффициенты пересчета отдельных видов минеральных удобрений в энергетические эквиваленты рассчитывали в своих исследованиях зарубежные и отечественные авторы, однако большинство из них не учитывали различие в энергоёмкости производства удобрений в сравниваемых странах.

Исходя из этого, в целях достижения наибольшей степени сопоставимости при сравнениях по странам в данной статье учитываются только прямые затраты энергоресурсов.

В связи с этим необходимо уточнить методику учета энергопотребления в сельхозпроизводстве России. Поскольку отечественная сельскохозяйственная статистика не учитывает потребление топливно-энергетических ресурсов в хозяйствах населения и крестьянских (фермерских) хозяйствах, все необходимые сравнения стран по показателям энергоэффективности могут быть корректно осуществлены только по отношению к показателям, относящимся к сельскохозяйственным организациям.

Для комплексной оценки энергоэффективности целесообразно пользоваться группой вспомогательных (индикативных) показателей эффективности. Они включают структурные показатели, показывающие различные варианты соотношений в энергопотреблении (между сельскохозяйственным производством и другими отраслями экономики, а также частные связующие показатели, отражающие уровень энергопотребления в сельскохозяйственном производстве относительно таких важнейших средств производства, как земля и труд. Имеются в виду техногенные энергетические затраты. Живой труд в данном случае не учитывается, поскольку уровень его энергозатрат намного ниже.

Приведем сопоставимые данные по группе показателей энергетической эффективности сельхозпроизводства по странам Европы (ЕС), Северной Америки, Океании и России.

Если учитывать все используемые в СХП энергоносители, то в среднем данная отрасль экономики не относится к крупным потребителям энергии. Доля СХП в структуре конечного энергопотребления изменяется в пределах 1-3%. Для России, Канады и Австралии это не создает особого напряжения в энергодолансе, поскольку собственное производство энергии относительно внутреннего ее потребления превышает 100%. Для стран, зависящих от импорта энергетических ресурсов (самообеспеченность ЕС-27 составляет, например, примерно 50%), даже незначительная доля энергопотребления, приходящаяся на СХП, заставляет думать об энергосбережении. Кроме того, по отдельным видам энергоносителей СХП может создавать существенную напряженность в энергодолансе. Речь идет о нефтепродуктах (бензин, дизельное топливо), наиболее активно используемых в предпосевных, посевных и уборочных полевых операциях[3; 134].

Доля дизельного топлива, например, вполне может превышать 5 и даже 10%.

Все показатели по энергоэффективности - по 10 странам ЕС (Великобритания, Германия, Дания, Италия, Испания, Нидерланды, Польша, Финляндия, Франция, Швеция); остальные данные - по 27 странам ЕС.ОЭСР), 6,3%, в том числе в США - 6,3, Италии - 6,7, Канаде - 8,1, Греции - 11,4, Австралии - 12,9%. В России, согласно тому же источнику, аналогичный показатель был еще выше - 16,2%. Учитывая, что более половины производимого в стране дизельного топлива идет на экспорт, при высоких мировых ценах на нефть и нефтепродукты стимулы к наращиванию экспорта будут расти, что может привести к росту цен на моторное топливо и даже его дефициту для сельскохозяйственных и других потребителей на внутреннем рынке [2; 76].

Анализ вспомогательных показателей, отражающих потребление энергии в расчете на основные средства производства, позволяет условно выделить две группы развитых

стран. Первая группа стран - с интенсивным «вложением» топливно-энергетических ресурсов в сельскохозяйственные угодья на фоне умеренной обеспеченности энергией занятых в сельхоз производстве. К ним относятся страны ЕС с интенсивностью энергозатрат на 1 га сельскохозяйственных угодий, достигающей 180 кг н.э. Вторая группа стран характеризуется относительно экстенсивным уровнем энергетических затрат на единицу площади сельскохозяйственных угодий. В нее входят страны Северной Америки и Океании. В странах Северной Америки при относительно низких затратах энергии на единицу сельскохозяйственных угодий наблюдается высокий уровень обеспеченности фермеров энергетическими ресурсами, что естественно, поскольку в США, например, число тракторов, приходящихся на одного занятого в сельском хозяйстве, в 1,6 раза больше, чем в Германии, и в 1,8 раза больше, чем в Испании.

В Австралии и особенно Новой Зеландии удельные затраты энергии в расчете на одного занятого относительно стран Северной Америки невелики. Однако энергоемкость СХП в этих странах заметно ниже, чем в большинстве развитых стран.

По уровню энергоемкости сельхоз производство России заметно превышает аналогичные показатели по всем рассматриваемым странам. По потреблению энергии в расчете на единицу площади сельскохозяйственных угодий наша страна отстает от стран ЕС. Несколько лучше выглядит Россия в системе показателей расхода энергоресурсов в расчете на одного занятого в СХП [1].

Активно развивающееся в последнее десятилетие и, по оценкам многих ученых, перспективное направление энергосбережения и снижения энергоемкости в СХП - использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и методов органического сельского хозяйства. Использование ВИЭ необязательно означает снижение энергоемкости, однако уже сейчас во многих случаях позволяет фермерам экономить расходы, связанные с приобретением привозных не возобновляемых энергоносителей, цены на которые весьма нестабильны. Дополнительные стимулы к развитию возобновляемой энергетики в сельской местности - характер самого сельскохозяйственного производства, генерирующего в процессе своей деятельности энергию, содержащуюся в отходах, а также наличие свободных площадей для использования солнечной, ветровой энергии, создания энергетических плантаций из быстрорастущих пород древесной, кустарниковой или травянистой растительности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев А.В. Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов и энергосбережение в России. - М.: Аналитический Центр при Правительстве Российской Федерации, 2008.
2. Магомедов Н.Д. Эффективность использования энергии - фактор экономической устойчивости сельского хозяйства США в условиях высоких цен на нефть. -М.: Восход-А, 2010. – 123 с.
3. Таран В.В. Концепция оценки энергетической эффективности и анализ комплекса формирующих ее факторов в сельском хозяйстве России. - М.: Информагротех, 2008. – 234 с.



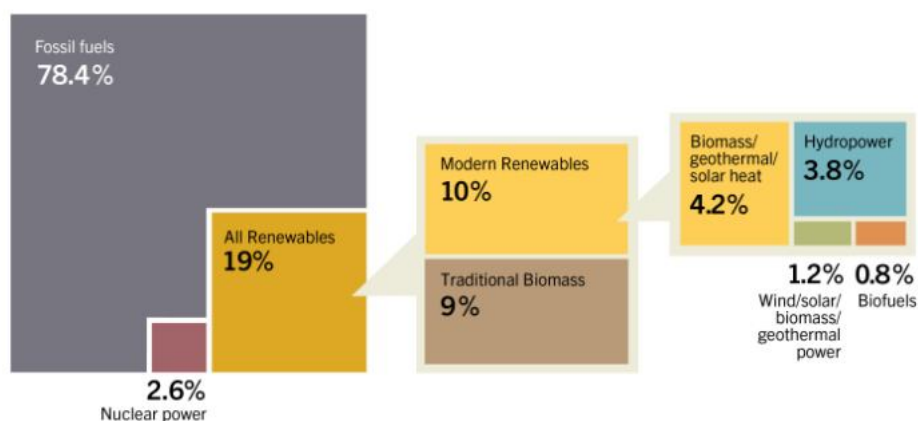
## ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Султанов В.В

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Большая часть электроэнергии, которую мы используем сегодня, получают, в основном, из ископаемых видов топлива, таких как уголь, нефть и природный газ. По оценкам международной сетевой организации «REN21», это более 78% (Рис. 1).[1]

Estimated Renewable Energy Share of Global Final Energy Consumption, 2012



REN21. 2014. *Renewables 2014 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat).



Рис. 1. Данные REN21 за 2012 год

Однако их использование происходит намного быстрее, чем образование. Пока таким путем человечество будет продолжать удовлетворять свои потребности в энергии, будут продолжать существовать проблемы воздействия на природу, социальные проблемы и проблемы устойчивого развития [2]. Поэтому в последние годы стало столь популярно развивать технологии добычи энергии из возобновляемых источников энергии, таких как солнце или ветер. Одним из популярных на сегодняшний день способов получения «экологичной электроэнергии» являются фотовольтаические (PV) электростанции. Одной из крупнейших солнечных PV электростанций в мире является «Perovo Solar Power Station» в Крыму. СЭС расположенная на площади в 200 гектар, обладает потенциалом генерировать около 132500 МВтч электроэнергии в год (или 0.1335 ТВтч в год).

Для сравнения можно провести некоторые идеализированные расчеты. По данным статистического ежегодника мировой энергетики «Enerdata» мировое потребление электроэнергии за 2013 год составило около 20000 ТВтч (Рис. 2).[3]

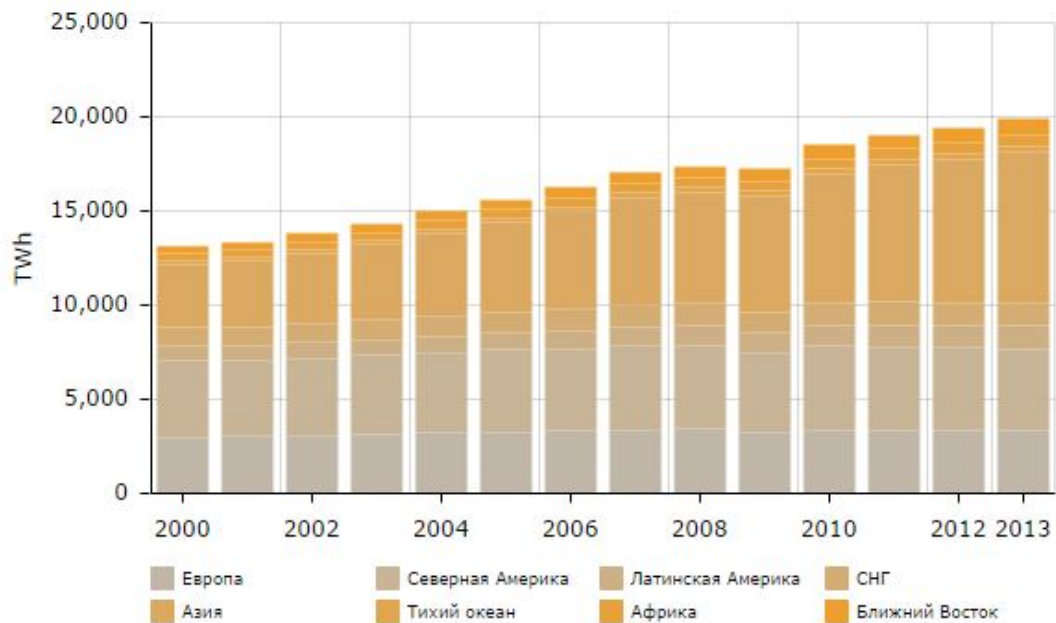


Рис. 2. Данные Enerdata по годовому потреблению электроэнергии

Для обеспечения такого количества электроэнергии необходимо построить около 150 тыс. таких электростанций как Перово в Крыму. Одна такая СЭС занимает площадь в 200 гектар (около  $2 \text{ км}^2$ ). 150 тысяч таких СЭС займут площадь 300 тыс.  $\text{км}^2$ , что составит около 0.0006% от площади нашей планеты (площадь планеты Земля – 510 072 000  $\text{км}^2$  [4]). Покрыв 0.0006% площади Земли солнечными панелями, человечество сможет утолить свою потребность в электроэнергии. Это площадь двух республик Башкортостан. На рис. 3 это изображено в мировых масштабах.



Рис. 3. Площадь СЭС для выработки 20000 ТВтч электроэнергии

В России по данным ОАО «СО ЕЭС» 2013 год было выработано 1,045 трлн кВт.ч [4](1045 ТВтч, около 5% от мирового). Для обеспечения солнечной электроэнергией всей России понадобится занять площадь 15 тыс. км<sup>2</sup> (около 0.0009% от всей площади России).

В Башкирии по данным филиала ОАО «СО ЕЭС» Башкирское РДУ за 2013 год электропотребление составило 25,71 млрд. кВтч [5](25 ТВтч, 0.024% от данных по всей России). Для обеспечения солнечной электроэнергией всего Башкортостана понадобится занять площадь 360 км<sup>2</sup> (около 0.0025% от всей территории Башкортостана). Это примерно половина площади территории Уфы.

Выглядит все довольно красиво и радужно, если учесть что основным элементом для создания солнечных панелей служит кремний (Si) один из самых распространенных элементов на земле. Но на сегодняшний день намного дешевле и выгоднее производить электроэнергию из традиционных источников. И поэтому развитие в России альтернативной энергетики на сегодняшний день мало актуально в масштабах электроэнергетики всей страны. Тем не менее, энергетическая инфраструктура России должна развиваться в рамках общемировых тенденций, поэтому в южных областях России необходимо строительство солнечных электростанций хотя бы в качестве полигонов для научных исследований. Так же альтернативные источники энергии отлично подходят в качестве автономного электроснабжения удаленных населенных пунктов, до которых по каким-либо причинам трудно и дорого тянуть линии электропередач из объединенной энергосистемы (примером является поселок «Северный» в РБ).

В Уфимском государственном авиационном техническом университете уже около двух лет ведутся практические исследования в области солнечной электроэнергетики после установки системы мониторинга тестовых фотоэлектрических систем (ТФЭС) предназначенной для проведения испытаний солнечных фотоэлектрических модулей в условиях реальной освещенности и климатических условий Российской Федерации. Электронный регистратор фиксирует значения параметров (ток, напряжение, мощность, температура, уровень солнечной иррадиации, скорость и направление ветра) в энергонезависимой памяти. На основе анализа полученных данных строится общая картина эффективности работы солнечных модулей в погодных условиях республики Башкортостан. Так же ведется исследование потенциала фотовольтаической солнечной электростанции в республике Башкортостан.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет организации «REN21» [Renewables Global Status Report: 2014 Update](#) (Paris: REN21 Secretariat), 2014, 32 с.;
2. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», №8 август 2007 [[http://esco-ecosys.narod.ru/2007\\_8/art003.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2007_8/art003.htm)];
3. Статистический ежегодник мировой энергетики «Enerdata» [<http://yearbook.enerdata.ru/>].
4. World. The World Factbook. Central Intelligence Agency [<https://www.cia.gov/>].
5. Сайт системного оператора единой энергосистемы ОАО «СО ЕЭС» [<http://www.soups.ru/>].

## КОМПЛЕКТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ

Асылханов А.Б., Ким Д.Э.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Одним из наиболее экономичных и эффективных технических решений для электроснабжения строительных и промышленных объектов являются **комплектные трансформаторные подстанции (КТП)**. На рис.1 показан КТП [1].



**Рис. 1.** Комплектная трансформаторная подстанция

Устройства принимают, преобразовывают и распределяют электроэнергию переменного тока частотой 50 Гц. Мощности производства КТП призваны удовлетворить потребность различных объектов и даже населенных пунктов в электроснабжении и учете электроэнергии. Высокие эксплуатационные характеристики моделей КТП сочетаются с такими их преимуществами, как доступная цена, оперативность монтажа-демонтажа и легкость запуска. Все изделия соответствуют требованиям государственных стандартов и международной системы ИСО 9001.

**Назначение и применение.** В настоящее время подстанции поставляются для самых разных отраслей экономики, где посредством КТП преобразуется и распределяется электроэнергия. Это, прежде всего, железнодорожное хозяйство, строительство, промышленность, предприятия ЖКХ и т. д.

В основе КТП используется силовой трансформатор. К элементам конструкции относится также низковольтное распределительное устройство, система автоматического управления и вспомогательные механизмы. Для большей надежности предусмотрен также ряд контрольно-измерительных и электрических блокировочных приборов.

Конструкции и оборудование КТП. Трансформаторные подстанции выполняются следующих типов: мачтовые (МТП), комплектные наружной установки (КТПН) и закрытые с размещением оборудования в отдельно стоящем помещении [2]. Оборудование мачтовых ТП устанавливается открыто на железобетонных или деревянных опорах. КТП наружной установки представляют собой единую крупноблочную конструкцию со смонтированным на заводе электрооборудованием. Они выполняются в виде металлических киосков или шкафного типа. Вводы 6-10 кВ и отходящие линии 0,4 кВ могут быть в зависимости от типа КТП воздушными или кабельными. КТП шкафного типа выпускаются с трансформаторами мощностью от 25 до 250 кВА на напряжение 6—10/0,4 кВ. Ввод 6-10 кВ и отходящие линии 0,4 кВ воздушные. Вводное устройство высокого напряжения, включающее проходные изоляторы, предохранители и разрядники, а также распределительное устройство 0,4 кВ размещены в металлических шкафах. Шкафы монтируются над силовым трансформатором. Трансформатор монтируется на раме, устанавливаемой на фундаменте из железобетонных стоек. Разъединитель устанавливается на концевой опоре ВЛ 6-10 кВ. В КТПН устанавливаются трансформаторы мощностью 100—630 кВ-А, выпускаются эти ТП с одним или двумя трансформаторами. Конструктивно

КТПН выполняют в виде металлического киоска с отдельными отсеками для распределительного устройства 6—10 кВ, распределительного щита 0,4 кВ и трансформатора. Данные КТП рассчитаны на установку одного или двух трансформаторов мощностью 250, 400, 630 кВ-А, напряжением 10/0,4 кВ. Двухтрансформаторные КТП предназначены (рис.2) [2] для питания потребителей не ниже второй категории.

Схема проходной ТП предусматривает присоединение к магистральным и кольцевым сетям 10 кВ. На стороне 0,4 кВ двухтрансформаторных ТП шины секционированы, осуществляется АВР секционным автоматом. Для КТПП характерно компактное расположение оборудования 10 кВ [2]. В отделении высокого напряжения смонтированы четыре выключателя нагрузки (два вводных и два для транзитных линий). Трансформаторы присоединяются через разъединители и предохранители. Присоединение ТП к ВЛ 10 кВ производится через разъединители, которые устанавливаются на концевых опорах.

Трансформаторные подстанции внутренней установки (закрытого типа) размещаются в отдельно стоящих капитальных зданиях, сооружаемых из сборного железобетона, кирпича, местных строительных материалов. Такие ТП чаще всего выполняются двухтрансформаторными для присоединения к кабельным или воздушным сетям 6-10 кВ и 0,4 кВ. Распределительные устройства 6-10 кВ закрытых ТП выполняются крупноблочными, комплектными. Для ТП с трансформаторами до 630 кВА применяются, как правило, камеры типа КСО-366, комплектуемые выключателями нагрузки, разъединителями, предохранителями. Габариты камер 1000x1000x2500 мм. Щит низкого напряжения также монтируется из отдельных панелей. На сельских ТП чаще всего применяются распределительные пункты из панелей одностороннего обслуживания типа ЩО-70. Камеры КСО-366 и щиты из панелей ЩО-70 изготавливаются на заводах электропромышленности.

Основными частями силового трансформатора являются: магнитопровод, обмотки высшего и низшего напряжений, бак с расширителем и крышка. Трансформаторы 6-10/0,4 кВ мощностью от 25 до 630 кВА, применяемые на ТП, имеют схемы соединений обмоток звезда – звезда с нулем и звезда – зигзаг с нулем. Более предпочтительной по условию работы трансформатора при несимметричных нагрузках в сети 380/220 В является вторая схема соединений. При такой схеме обмотка каждой фазы низшего напряжения состоит из двух частей, расположенных на разных стержнях магнитопровода. Следовательно, при несимметричной нагрузке магнитный поток в магнитопроводе распределяется более равномерно, что делает практически равными токи и напряжения в обмотках всех фаз.

Трансформаторы мощностью 100 кВ-А и выше оборудуются также термосифонным фильтром, заполняемым силикагелем, осуществляющим непрерывную регенерацию масла. Выключатели нагрузки позволяют производить оперативные переключения под нагрузкой. Разъединителями разрешается производить операции включения и отключения только при небольших значениях токов нагрузки (х. х. трансформатора, ненагруженная линия и т. д.). Значение максимального тока, отключаемого разъединителями (в закрытых ТП), не должно превышать 4,5 А при напряжении 6 кВ и 2,5 А при напряжении 10 кВ. Разъединителями на номинальное напряжение 10 кВ, установленными в ТП напряжением 6 кВ, можно отключить токи до 5,5А. Плавкие предохранители служат для защиты электроустановок от сверхтоков. Предохранители выпускаются на напряжения 6 и 10 кВ для наружной установки типа ПКН и для внутренней установки типа ПК.

**Монтаж КТП и ТП на объектах.** На рис. 2 показан монтаж КТП [4].



**Рис. 2.** Монтаж КТП

КТП (в металлических корпусах) устанавливаются нижними опорными рамами на фундаментные железобетонные стойки или балки после выверки корпуса ТП на фундаменте. Рамы закрепляются болтами или сваркой к оголовникам и опорным уголкам стоек или к закладным скобам балок.[4].

Двухтрансформаторные ТП собираются из двух специальных блоков однотрансформаторных КТПП, установленных на расположенных рядом фундаментных основаниях. Корпуса обеих КТПП после выравнивания в горизонтальных и вертикальных плоскостях соединяются между собой болтами или сваркой, а затем их опорные рамы закрепляются сваркой к фундаментам. Затем в них устанавливается оборудование, демонтированное на время транспортировки, и производятся все необходимые соединения оборудования между собой и с распределительными сетями. В верхней части корпусов КТП и КТПП в специальные отверстия устанавливаются проходные изоляторы типа Пн-10 или Пн-6. С наружной стороны корпуса (также вверху) на кронштейнах закрепляются штыревые изоляторы высокого и низкого напряжений и вентильные разрядники. Трансформатор устанавливается на рабочее место, и его выводы соединяются шинами с устройствами высокого и низкого напряжений. Выводы трансформаторов у ТП мощностью до 250 кВА закрываются защитным кожухом. На КТП и КТПП с кабельными выводами, переделанными на воздушные, на верхней части корпуса устанавливается конструкция с изоляторами для выводов. В соответствии со схемой и инструкцией устанавливаются блок-замки типа МГБ с секретом для механической блокировки приводов разъединителя, находящегося отдельно на вводной концевой опоре ВЛ1, и его заземляющих ножей с дверями устройства 6—10 кВ с приводом вводного рубильника или автомата на щите НН и т. п. В контактные губки предохранителей на высокое напряжение типа ПК и низкого напряжения типа ПН2 вставляются их патроны с плавкими вставками. Устройство 6-10 кВ соединяется шинами с выводными проходными изоляторами, а последние – гибкими голыми проводами с питающей ВЛ на концевой опоре; присоединяются разрядники. Секционные шины высокого и низкого напряжений обоих блоков на двухтрансформаторных КТПП соединяются между собой шинными мостами (коробами). Провода линий низкого напряжения, выведенные из КТП и КТПП на изоляторы, соединяются с линейными проводами, идущими от ближайших концевых опор ВЛ 0,4 кВ. При кабельных выводах прокладываются кабели 6—10 и 0,4 кВ, которые заводятся в КТЦ и КТПП, разделяются и их концы закрепляются в кабельные муфты или воронки, а затем

присоединяются к аппаратам. Присоединяются шины заземления оборудования и корпуса КТП и КТПП к внешнему заземляющему контуру.

**Монтаж ТП закрытого типа:** Монтаж ТП закрытого типа на объекте в основном заключается в установке и сборке оборудования, скомплектованного в секции-блоки и монтажные узлы, а также в соединении этого оборудования шинами и проводами, изготовленными на МЗУ, соответственно между собой и с распределительными сетями ВН и НН [4]. В принятые под монтаж помещения перемещают скомплектованные из камер КСО-366 секции-блоки и панели щитов низкого напряжения, силовые трансформаторы и другое оборудование. Секции из камер КСО и щитов устанавливаются на заделанные в полу закладные опорные швеллеры, выверяются по горизонтальным и вертикальным осям, после чего их нижние рамы прикрепляются сваркой или болтами к швеллерам. Трансформаторы выверяются и закрепляются на закладных опорных швеллерах тормозными упорами, подложенными под все четыре катка. Проходные изоляторы типа Пн-6 – Пн-10 устанавливаются на плиты, заделанные при строительстве в стенных проемах. Сборные шины секции-блоков ВН и НН соединяются соответственно между собой, с трансформаторами и с вводными проходными изоляторами. Выводные провода прокладываются в газовых трубах, делается проводка освещения в помещениях ТП, устанавливаются на наружной стене ТП конструкции с изоляторами для выводов 6-10 и 0,4 кВ. Кроме того, производятся те же работы, что и при монтаже КТПП.

**Комплектное оборудование ТП мачтового типа.** Комплектное оборудование ТП мачтового типа монтируется на установленные деревянные или железобетонные опоры с использованием для его крепления к конструкциям опор заранее изготовленных крепежных деталей (хомуты, болты, планки и т. д.) [4]. Разъединители соединяются с приводами трубчатыми тягами и регулируются. На опорах устанавливаются складные лестницы и блокировочные замки к лестницам и приводам, а также линейные изоляторы 6-10 и 0,4 кВ. Аппараты 6-10 кВ стальными шинами и проводом ПС-25 соединяются между собой, с трансформаторами и питающими линиями. Газовые трубы с проложенными в них проводами закрепляются к опорам скобами, а затем эти провода присоединяются к изоляторам 0,4 кВ трансформаторов, к аппаратам в шкафу 0,4 кВ и к воздушным линиям. Нейтрали трансформаторов и их баки, разрядники, рамы разъединителей и предохранителей, приводы и шкафы 0,4 кВ присоединяются к шинам заземления, ранее проложенным по опорам и соединенным с заземляющим контуром.

Закключение:

В процессе работы были изучены классификация и устройство КТП, которые являются одним из наиболее экономичных и эффективных технических решений для электроснабжения строительных и промышленных объектов. Кроме того, были рассмотрены особенности производственных механизмов обеспечивающих технологические процессы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. [www.KTZ.kz](http://www.KTZ.kz)
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Энергия, 1977. – 288с.
3. Правила техники безопасности при эксплуатации распределительных электросетей. – М.: Энергия, – 1969. – 134 с.
4. Монтаж и эксплуатация ТП 6-10/0,4 кВ сельскохозяйственного назначения. – М.: Энергия, – 1978. – 96 с.
5. Правила устройств электроустановок (ПУЭ) издание 7, 2001-2004.

## **РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПАЛЬНО НОВОГО ПОДХОДА К ТЕХНИЧЕСКОМУ ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ**

Москалёв И.Л., Литвак В.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В данной работе рассмотрены ключевые моменты разрабатываемой «Методики технического диагностирования элементов тепловых сетей» (далее Методика). Целью Методики является повышения промышленной безопасности и технической надежности элементов тепловых сетей (далее ЭТС) посредством определения остаточного ресурса ЭТС на основании дефектообразования.

В ходе разработки Методики учитывался передовой опыт отечественных и зарубежных специалистов в сфере диагностики и оценки рисков. [1-4] В статье изложен рекомендуемый порядок и правила определения технического состояния и срока надежной эксплуатации ЭТС.

Техническое диагностирование ЭТС производится с целью:

- оценки фактического состояния, эксплуатируемого ЭТС;
- оценки срока надежной эксплуатации;
- разработки рекомендаций по дальнейшей эксплуатации ЭТС.
- Задачами технического диагностирования ЭТС являются:
  - оценка базовых характеристик эксплуатируемого ЭТС;
  - диагностирование и контроль технического состояния;
  - ранжирование эксплуатируемых ЭТС по их надежности;
  - прогнозирование технического состояния.

Решение о проведении технического диагностирования принимает собственник ЭТС.

Работы по техническому диагностированию проводятся экспертной организацией на основании договора с собственником ЭТС.

Методика распространяется на все элементы, участвующие в транспортировке горячей воды и пара (в соответствии с классификацией [5] трубопроводы IV категории), входящие в состав тепловых сетей.

### **Периодичность проведения:**

Срок службы ЭТС устанавливается проектной организацией и указывается в паспорте на ЭТС. При отсутствии данной информации срок службы для трубопроводов тепловых сетей устанавливается равным 25 лет в соответствии с [6].

Впервые диагностирование проводят после строительства нового участка тепловой сети или капитального ремонта. В дальнейшем техническое диагностирование проводится в соответствии со сроками безопасной эксплуатации, установленными по результатам предыдущего технического диагностирования.

Внеочередное техническое диагностирование элементов проводится в случае аварии на участке теплоснабжения, либо по решению собственника ЭТС.

Решение о продолжении эксплуатации ЭТС в пределах сроков надежной эксплуатации, его замене или ремонте принимается собственником ЭТС. Решение не должно противоречить выводам, полученным по результатам предыдущего технического диагностирования.

### **Алгоритм проведения технического диагностирования:**

В общем случае техническое диагностирование ЭТС должно выполняться по представленному на рисунке 1 алгоритму.

Результатом первого этапа работ является оценка базовых характеристик ЭТС на основании собранной исходной информации. Далее проводится второй этап



технической диагностики - обследование ЭТС, результатом которого является перечень обнаруженных дефектов. На основании данного перечня проводится оценка технического состояния ЭТС. На основании результатов первого и второго этапов технического диагностирования проводится комплексная оценка, которая позволяет определить перечень необходимых корректирующих мероприятий, а также оценить срок надежной эксплуатации ЭТС. Четвертый этап включает в себя оформление отчетной документации в установленном порядке.



Рис. 1. Алгоритм проведения технического диагностирования ЭТС

#### Сбор информации о ЭТС:

На первом этапе проводится сбор информации об ЭТС. Информацию предоставляет собственник ЭТС. Достоверность предоставляемой информации обеспечивает руководитель данной организации. Собранная информация группируется отдельно для каждого ЭТС. Перечень документации, которую предоставляет собственник ЭТС:

- паспорт ЭТС;
- геосъемка трубопровода;
- акты гидравлических испытаний;
- журнал анализов сетевой воды;
- журнал дефектов;
- проект электрохимической защиты (при наличии);
- акты приборного электрометрического обследования (при наличии);
- журнал контрольных обходов ЭТС (не старше года);
- акт плановых шурфовок подземных прокладок (не старше года);

- схема с участком ЭТС (на ней изображаются: отдельные участки тепловой сети с указанием длин, диаметров и способов прокладки, тепловые пункты, тепловые камеры, компенсаторы, задвижки, неподвижные опоры).

Дополнительно предоставляются другая необходимая документация.

#### Приборное обеспечение диагностических работ.

Приборы и оборудование, применяемое при проведении обследования ЭТС должны соответствовать следующим условиям:

- наличие сертификата (паспорта) изготовителя, свидетельства об аттестации, описания технологии контроля и свидетельства о плановых периодических поверках (аттестация, калибровка и т.д.);
- использование неисправных приборов не допускается;
- все действия по настройке и контролю чувствительности измерительных приборов документируются (настройка производится на аттестованных рабочих образцах).

Перечень типовых средств контроля и измерений представлен ниже (таблица 1).

**Таблица 1.** Список типовых средств измерения и контроля

№ п/п	Тип прибора	Назначение	Технические характеристики
1	Индикаторы зон концентраций напряжений по методу магнитной памяти металла	Определение магнитных аномалий	Диапазон измерения величины $H_r$ , А/м - от - 2000 до + 2000
2	Акустический томограф	Определение зон повышенных механических напряжений	Точность определения местоположения течи -1% от длины участка
3	Акустический течеискатель	Определение мест утечек	
4	Корреляционный течеискатель	Определение мест утечек на сложных участках	Разрешающая способность, 1 м
5	Трассопоисковые системы	Определение местоположения и глубины залегания подземных коммуникаций. Обнаружение дефектов наружного изоляционного покрытия ЭТС	Погрешность при измерении в зависимости от глубины залегания до 20м – 25см до 5м - 15см
6	Инструменты и приборы для визуального и измерительного контроля (линейка, лупа, штангенциркуль и т.д.)	Визуальное выявление и измерение поверхностных дефектов	
7	Регистратор потенциалов трубопровода	Измерение потенциалов трубопровода	Погрешность измерения - 0,01 В
8	Приборы для измерения удельных сопротивлений	Определение удельных сопротивлений грунтов	Погрешность измерения - 0,1 Ом
9	Ультразвуковой толщиномер	Определение степени эрозионного и коррозионного износа по остаточной толщине	Диапазон измеряемых толщин, от 0,5 до 50 мм, при температуре окружающей среды от -30 до +50°C
10	Ультразвуковой дефектоскоп, в том числе сканирующий	Выявление параметров внутренних дефектов в сварных соединениях и основном	Площадь минимально выявляемого дефекта, - от 0,8 до 1,0 мм <sup>2</sup> .

Для диагностики ЭТС рекомендуется использовать приборы, указанные в таблице 2.

**Таблица 2.** Дополнительные приборы и оборудование

№ п/п	Тип прибора	Назначение
1	Магнитный дефектоскоп	Магнитная структурометрия (анализ структуры материалов) и толщинометрия (измерение толщины)
2	Магнитоанизотропный дефектоскоп	Обнаружение и построение карт напряженно-деформированных состояний
3	Переносной импульсный рентгеновский аппарат	Определение внутренних дефектов металла, сварных швов
4	Акустикоэмиссионные системы	Обнаружение дефектов в виде трещин, выявление их местоположения и характеристик
5	Волноводный сканер	Диагностика недоступных участков ЭТС
6	Тепловизор	Определение участков ЭТС с повышенными тепловыми потерями

#### **Проведение технического диагностирования:**

Поверхности ЭТС, подлежащие контролю, должны быть очищены от загрязнений. Требования к подготовке поверхности определяется требованиями нормативных документов на применяемые методы контроля, а объем контроля - требованиями настоящей Методики.

В случае обнаружения утечек теплоносителя на любом этапе технического диагностирования, работы по диагностированию приостанавливаются до устранения утечек. Выполнение мероприятий по устранению утечек обеспечивает собственник ЭТС.

Непосредственно работы по обследованию ЭТС выполняются в соответствии с требованиями нормативной документации на соответствующие методы контроля. Все проводимые работы протоколируются. При обнаружении дефектов производится их обязательная фотофиксация с отметкой в протоколе.

В случае обнаружения дефектов, которые оказывают влияние на целостность ЭТС и существенно снижают его надежность, проводящие контроль лица должны уведомить ответственного представителя собственника ЭТС о найденных неисправностях.

В следующих работах будут рассмотрены принципы и основные положения анализа и обработки результатов диагностики, перечень критериев отбраковки, основные положения и подходы к оценке остаточного ресурса.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Горских, А.А. Мониторинг надежности тепловых сетей/ В.Н. Мелькумов, С.Н. Кузнецов, К.А. Складов, А.А. Горских//Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. -2010.-№1(17). -С.52-58.
2. Дильман, М. Д. Методы и модели обоснования надежности систем теплоснабжения и источников теплоты: Дис.канд. техн. наук. М., 2000. 188 с.
3. V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. Kavuri and K. Yin, 2003, A Review of Process Fault Detection and Diagnosis Part I Quantitative Model-Based Methods, Computers and Chemical Eng., 27, pp. 293–311.
4. K. Detroja, R. Gudi and S. Patwardhan, 2005, Plantwide Detection and Diagnosis using Correspondence Analysis, Control Engineering Practice.

5. «Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды» - ПБ 10573-03.
6. Типовой инструкцией по периодическому техническому освидетельствованию трубопроводов тепловых сетей в процессе эксплуатации (РД 153-34.0-20.522-99).

## **АЭРОДИАГНОСТИКА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Лебедев Д.Е.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Проблема своевременного обнаружения дефектов ВЛЭП с последующим устранением для того, чтобы предотвратить незапланированное отключение линии, всегда была актуальной. А по причине большого износа электротехнического фонда такая работа «на предупреждение» имеет как прикладной интерес с точки зрения упрощения эксплуатации ВЛЭП, так и большой экономический эффект, обусловленный уменьшением расходов на замену оборудования, расходов на компенсацию потерь электроэнергии, а также уменьшением затрат на заработную плату обслуживающему и ремонтному персоналу.

Опыт эксплуатации показывает, что основными причинами отказа основных элементов ВЛ 35–500 кВ являются атмосферные, климатические и сторонние воздействия. Основными факторами, приводящими к нарушению работоспособного состояния воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) и их повреждению, являются: несоответствие проектных решений фактическим климатическим условиям, неудовлетворительное техническое состояние элементов ВЛЭП, неудовлетворительное состояние трасс ВЛЭП и прилегающих к ним лесных массивов [1].

В настоящее время существует несколько методов контроля ВЛЭП, призванных поддерживать работоспособное состояние линии, например:

1. тепловизионный контроль,
2. ультрафиолетовая дефектоскопия,
3. визуальный контроль,
4. регистрация электромагнитных разрядных процессов и пр.

Перечисленные методы применяются в ходе организации процесса диагностики линии, который может принимать следующие формы:

1. пешие обходы линий,
2. объезды линий на авто- и мототранспорте,
3. облеты линий на вертолете,
4. диагностика линий с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

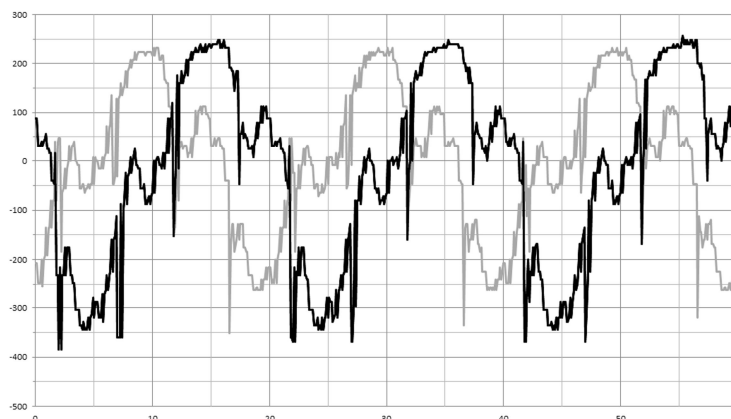
Целью данной работы является разработка нового способа, особенность которого состоит в том, что управление БПЛА происходит при помощи самой линии.

В случае управления БПЛА по электрическому полю в ручном режиме располагают БПЛА под или над проводами ВЛ, выполненной на опорах порталного типа, и по радиоканалу включают устройство автоматического пилотирования, задавая расстояние до провода (высоту полета) величиной  $E_0$ . На концах крыльев устанавливают датчики измерения электрического поля. Измеренное на концах крыльев и усредненное по двум датчикам значение напряженности электрического поля  $E_{ср}$ , вводят в систему автоматического пилотирования летательным аппаратом,

после чего сравнивают с величиной  $E_0$ . Более детально способ пилотирования описан в [2].

Управление БПЛА с помощью магнитного поля аналогично управлению при помощи электрического поля. Процесс детально описан в [3].

Были созданы прототипы датчиков магнитного поля, представляющие собой катушки из 6000 витков, намотанные на прямоугольный немагнитный каркас. Затем под линией 500 кВ был проведен эксперимент по определению чувствительности, созданных датчиков. Одна из полученных осциллограмм представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Осциллограмма сигналов электромагнитных датчиков под линией 500 кВ;  
ось ординат – напряжение, мВ,  
ось абсцисс – время, мс

Серая и черная кривые показывают сигналы, полученные датчиками, зафиксированными на одной плоскости, расстояние между которыми было равно двум метрам. Таким образом, данную систему можно рассматривать как макет БПЛА с датчиками. Из рисунка видно, что выбранного количества витков уже достаточно для уверенного приема сигнала промышленной частоты. Если учесть то, что летательный аппарат, в случае его расположения над линией, будет вынужден находиться дальше от линии, чем в случае его пролета под линией, для надежного приема сигнала на больших расстояниях необходимо предусмотреть возможность подключения датчиков через усилитель. Также из рисунка видно, что полезный сигнал сильно искажен высокочастотными помехами. Поэтому помимо усилителя в состав измерительной аппаратуры должны быть включены фильтры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. – Новосибирск: Наука, 2009. – 136 с.
2. Патент РФ № 2421746 (от 20.06.2011), МПК G01R31/08. Способ диагностики высоковольтной линии электропередачи / В.Е. Качесов, Д.Е. Лебедев // БИ № 17, 2011.
3. Патент РФ № 2483314 (от 18.11.2011), МПК G01R31/08. Способ аэродиagnостики высоковольтной линии электропередачи / В.Е. Качесов, Д.Е. Лебедев // БИ № 15, 2013.

## ЭНЕРГЕТИКА БИОСФЕРЫ

Денисова М.А., Ковальчук С.С., Ковальковская Н.О.  
Омский Государственный Технический университет, г. Омск

В соответствии с учением В.И. Вернадского (1863-1945) первоисточником, породившим биосферу, является космическая лучистая энергия, а живое вещество Земли является планетарным событием космического характера, оно выступает как своеобразный накопитель и трансформатор лучистой энергии мирового пространства [3; 128].

Так, живое вещество в форме зеленого растительного мира накапливает энергию, которая может сохраняться миллионы лет в виде различных топливно-сырьевых ресурсов (газа, нефти, угля, торфа, урана и т.д.). Однако, Земля, как открытая система, обменивается энергией с космосом и поэтому происходит непрерывное изменение биосферы, ее эволюция, которая идет в сторону роста «свободной энергии биосферы», выражая тем самым наиважнейшую естественно – историческую закономерность развития живого на нашей планете.

Биосфера и любой биогеоценоз из-за колебаний параметров их окружения стремятся занять более устойчивый энергетический уровень с меньшими колебаниями продукционного процесса. При этом часто происходит снижение его величины. Развитие информации, усложнение структуры биосферных образований направлены на увеличение их приспособляемости и адсорбции энергии и вещества, т.е. на повышение своего энергетического уровня в конкретных условиях и не в ущерб его стабильности.

Учение об эволюции биосферы подводит нас к тому, что человек должен, с одной стороны, уменьшить потребление биохимической энергии, а с другой - интенсифицировать продукционный процесс в биосфере, т.е. поднять последнюю на более высокий энергетический уровень. Ускорение же деструкции продуцентов и другого живого вещества произойдет спонтанно, за счет увеличения потребления их человеком и создания им благоприятных условий для развития деструкторов, в частности, улучшающих почвообразовательный процесс или утилизирующих отходы антропогенной деятельности.

В связи с вышеизложенным, перед человеком стоит двуединая задача: повышение энергетического уровня биогеоценозов и всей биосферы, усиление продукционного процесса и ускорение биогеохимических циклов; обеспечение их стабильности. Солнечная энергия вызывает на нашей планете большой (геологический) круговорот, на основе которого развивается малый – биологический. Поверхность Земли получает ежегодно от Солнца около  $5 \cdot 10^{20}$  ккал лучистой энергии. На создание же органического вещества расходуется только 0,1 - 0,2%, т.е. усваивается  $90 \cdot 10^{16}$  ккал фотосинтетически активной радиации.

Возможность поднятия биосферы на более высокий энергетический уровень обоснована тем, что она является открытой термодинамической системой, причем продуценты работают против увеличения энтропии, что уменьшает опасность «перегрева» биосферы и «тепловой смерти».

Современная наука и передовая практика доказывают, что за счет правильного использования биосферных ресурсов, на основе развития науки путем преобразования абиотической среды во всех географических поясах и создания набора новых видов и сортов продуцентов можно достичь 1 - 2 % использования солнечной энергии. Назрел вопрос рационального использования человечеством энергии ветра, солнца, приливов, отливов и продукции продуцентов мирового океана. В этом случае, возможно достичь

7-10% использования продуцентами солнечной энергии и 5-20% энергии абиотического круговорота [3; 134].

Агроэкосистемы получают дополнительный поток энергии (дополняющий или даже заменяющий солнечную) в результате деятельности человека - в виде мышечных усилий человека и животных, удобрений, пестицидов, поливной воды, работы машин (действующих на горючем топливе) и т.д. и характеризуются, как правило, более высокой биологической продуктивностью. Так, чистая первичная продукция естественных биоценозов умеренной зоны для лесов составляет от 600 до 2500 г/м<sup>2</sup> в год, для степей от 150 до 1500 г/м<sup>2</sup> в год, а для возделываемых земель до 4000 г/м<sup>2</sup> в год [1; 34].

Продукция агроценозов используется не консументами и редуцентами и идет в круговорот веществ, а используется для удовлетворения потребностей человека. Сущность ведения сельского хозяйства заключается в использовании энергии и материалов с целью повышения продуктивности агроэкосистем, для получения максимума продукции, необходимой для удовлетворения экономии энергетических затрат, нормального функционирования экономики и производства сельскохозяйственной продукции. На пороге грядущего тысячелетия это становится одной из ключевых задач. В сельском хозяйстве расходуется около 15% энергии от всех производственных энергозатрат человечества. Следовательно, мерой производственных возможностей общества может служить его энергетический бюджет. В этой связи проблема роста объемов продовольствия - это проблема энергетическая, поскольку на каждую калорию продовольствия приходится затрачивать от 1,5 до 4,5 калорий энергии, материализованной в средствах производства [1; 36].

По мере роста продуктивности сельскохозяйственного производства затраты невосполнимой энергии на единицу произведенной продукции обычно возрастают, так как на каждую калорию невосполнимой энергии при интенсивных технологиях получают только 2 - 4 пищевых калории.

Использование энергии удобрений и пестицидов, поливной воды, топлива в машинах повышает кратность энергии труда на стадии опосредования обмена веществ. Использование солнечной радиации возделываемыми растениями приумножает энергию труда и машин вместе взятых.

Анализ энергетических затрат и сопоставление их с общим объемом продуктов фотосинтеза позволяет понять реальную роль растениеводства, как важнейшей отрасли АПК, в стабилизации окружающей среды и эффективности аграрного сектора.

В растениеводстве из всей затраченной в период вегетации растений энергии солнечных лучей значительная ее часть расходуется на обеспечение процессов транспирации и дыхания, на развитие вегетативных органов растений и т.д. На формирование же непосредственного урожая расходуется небольшая часть энергии поглощенных солнечных лучей, а в итоге соотношение между аккумулированной в урожае энергии Солнца и затраченной энергией невосполнимых энергоресурсов при интенсивном ведении сельскохозяйственного производства, в лучшем случае не превышает 1:5 [2; 345].

Ряд исследователей отмечают, что с энергетической точки зрения величина биоэнергетического коэффициента, служащего для оценки энергетической эффективности растениеводства, должна стремиться к 1 и даже превышать ее. Только в этом случае сельское хозяйство имеет возможность перекрыть расходы совокупной энергии производством органического вещества. Так, на примере зерновых культур с их высокой калорийностью установлено, что можно получить величину биоэнергетического коэффициента на уровне 2,13 относительных единиц. В то же

время в садоводстве эта величина пока не достигнута, т.к. велик временной разрыв между закладкой насаждений и получением урожая. Кроме того, значительное время требуется для выращивания посадочного материала, проходит не один год, когда энергия тратится, и не восполняется готовой продукцией, да и энергетическая ценность плодов невелика.

В то же время, значение плодов состоит не столько в их питательной (энергетической), сколько в лечебно-оздоровительной ценности. Общеизвестно, что плоды являются источником витаминов и других жизненно важных элементов для организма человека. И все же повышение энергетической эффективности садоводства возможно за счет перехода к современным слаборослым типам садов. Эти сады должны характеризоваться быстрым вступлением в пору промышленного плодоношения и коротким периодом эксплуатации. Также следует использовать скороплодные, высокоурожайные, устойчивые к факторам внешней среды сорта, обеспечивающие получение высоких урожаев с меньших площадей. Все это позволяет повысить уровень использования вовлекаемой в производство плодов энергии и обеспечить их высокоэффективное в энергетическом отношении выращивание, снизив при этом антропогенную нагрузку на окружающую среду.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин, Н.М. Биоэнергетическая оценка технологий производства продукции растениеводства – Мичуринск.: Наукоград, 2007. - 57с.
2. Вронский В.А. Прикладная экология: учебное пособие - Ростов н/Д.: Феникс, 2006. - 512 с.
3. Дювиньо П. Биосфера и место в ней человека (экологические системы и биосфера) - М.: Прогресс, 2003. - 270с.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ БИФУРКАЦИОННОГО АНАЛИЗА ЕГО ДИНАМИКИ

Рускин В.А., Михальченко С.Г.\*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

\*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
г.Томск

Полупроводниковые преобразователи электрической энергии относятся к системам автоматического управления с импульсной модуляцией, математическое описание которых представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений. Основным элементом, определяющим нелинейность контура регулирования силовым преобразователем, является импульсный модулятор, особенности которого зависят в общем случае от вида модуляции [1]. Наличие нелинейности приводит к неединственности решений, а значит, возможны случаи одновременного существования различных форм выходного сигнала, определяемых коммутационной функцией КФ.

В связи с тем, что импульсно-модуляционная система всегда нелинейна, в ряде случаев, описанных в [3,4], возникает острая необходимость анализа режимов работы, их устойчивости и рассмотрения сценариев смены одного режима на другой.



За основу исследований [5], был взят стабилизатор напряжения с ШИМ, выполненный на основе понижающего преобразователя напряжения, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 1.

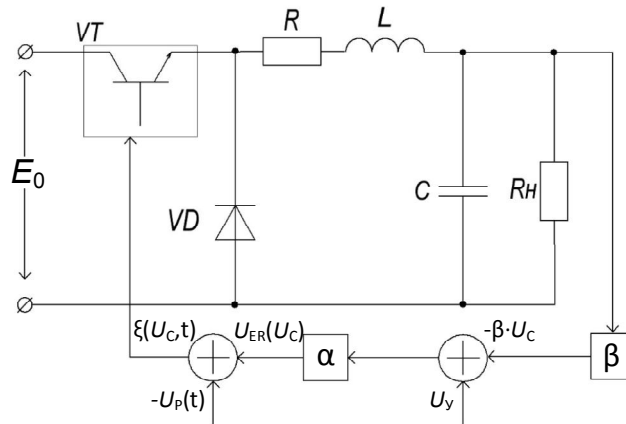


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема преобразователя

На схеме введены следующие обозначения:  $E_0$  – напряжение питания ( $E_0=1040$  В);  $R$  – сопротивление, характеризующее потери в индуктивности и в регуляторе ( $R=10,6$  Ом);  $K_F$  – функция, однозначно описывающая коммутации транзистора  $VT$  и диода  $VD$ ;  $L$  и  $C$  – индуктивность и емкость фильтра преобразователя ( $L=0,1$  Гн,  $C=10-6$  Ф);  $R_H$  – сопротивление нагрузки ( $R_H=100$  Ом);  $\beta$  – коэффициент передачи датчика обратной связи по выходному напряжению ( $\beta=0,01$ );  $U_y$  – управляющее (задающее) напряжение ( $U_y=5$  В);  $\alpha$  – коэффициент усиления звена пропорционального регулятора; частота ШИМ 10 кГц.

При построении математической модели, как и в [1], приняты следующие допущения: полупроводниковые приборы представлены идеальными моделями, конденсатор и дроссель – элементами с сосредоточенными параметрами.

Динамическая модель непрерывной части схемы замещения преобразователя описывается системой дифференциальных уравнений, представляющих собой задачу Коши:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B}(K_F(\xi(\mathbf{X}, t))), \\ \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0; \end{cases} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_H} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \frac{E_0}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} i_L \\ U_C \end{bmatrix}; \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица коэффициентов;  $\mathbf{B}(K_F(\xi(\mathbf{X}, t)))$  – вектор вынуждающих воздействий;  $\xi(\mathbf{X}, t) = U_{ER}(\mathbf{X}, t) - U_p(t)$  – разностная функция обратной связи, описывающая разность между сигналом ошибки  $U_{ER}(\mathbf{X}) = \alpha \cdot (U_y - \beta \cdot [\mathbf{X}]_2)$  и пилообразным напряжением  $U_p(t)$ , формируемым генератором развёртывающего напряжения;  $K_F(\xi(\mathbf{X}, t)) = (1 + \text{sign}(\xi)) / 2$  – коммутационная функция.

На каждом участке линейности решение системы уравнений (1) может быть записано в виде:

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} (\mathbf{X}_0 + \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}(K_F)) - \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}(K_F). \quad (2)$$

Это решение зависит от начальных условий интегрирования  $\mathbf{X}_0$  и  $t_0$ . Каждый тактовый период ШИМ  $\tau$  разделен на два основных режима, границы которых

определяются началом  $k$ -того тактового интервала ШИМ  $(k-1)\tau$  и моментом коммутации транзистора  $t_k$ . Исходя из выражения (2), на первом участке постоянства структуры (от начала тактового интервала ШИМ до момента коммутации ключа)  $(k-1)\tau \leq t \leq t_k$  вектор вынуждающих воздействий принимает значение  $B_I$ , а решение будет иметь вид:

$$X(t) = e^{A(t-(k-1)\tau)} (X_{k-1} + A^{-1} \cdot B_I) - A^{-1} \cdot B_I \quad (3)$$

Значение вектора  $X(t)$  в момент коммутации равно:

$$X(t_k) = e^{A(t_k-(k-1)\tau)} (X_{k-1} + A^{-1} \cdot B_I) - A^{-1} \cdot B_I \quad (4)$$

Рассчитанное по формуле (4) значение будет играть роль начальных условий при интегрировании на втором участке постоянства структуры  $t_k \leq t \leq k\tau$ , на котором вектор вынуждающих воздействий равен  $B_{II}$ , а решение описывается следующим образом:

$$X(t) = e^{A(t-t_k)} (X(t_k) + A^{-1} \cdot B_{II}) - A^{-1} \cdot B_{II} \quad (5)$$

Значение вектора  $X(t)$  на правом конце  $k$ -того тактового интервала ШИМ, вычисляемого по уравнению (5), выступает начальными условиями для расчетов на следующем  $(k+1)$ -ом интервале и т.д

Упрощенная блок-схема алгоритма решения задачи Коши (1), основанная на формулах (3)-(5) показана на рис. 2. Алгоритм представляет собой цикл по количеству тактовых интервалов с вложенным в него циклом расчета времени с переменным шагом.

От начала тактового интервала расчет производится с большим шагом, равным  $0.1\tau$ . При пересечении точки коммутации ключа  $t_k$  в алгоритме предусмотрено возвращение к точке с параметрами, рассчитанными за один шаг до коммутации. От этой точки до момента коммутации расчёт ведётся с уменьшенным шагом. Данная процедура позволяет с одной стороны значительно сократить время расчётов, а с другой – увеличить точность вычисления моментов коммутации и вектора переменных состояний  $X(t)$ .

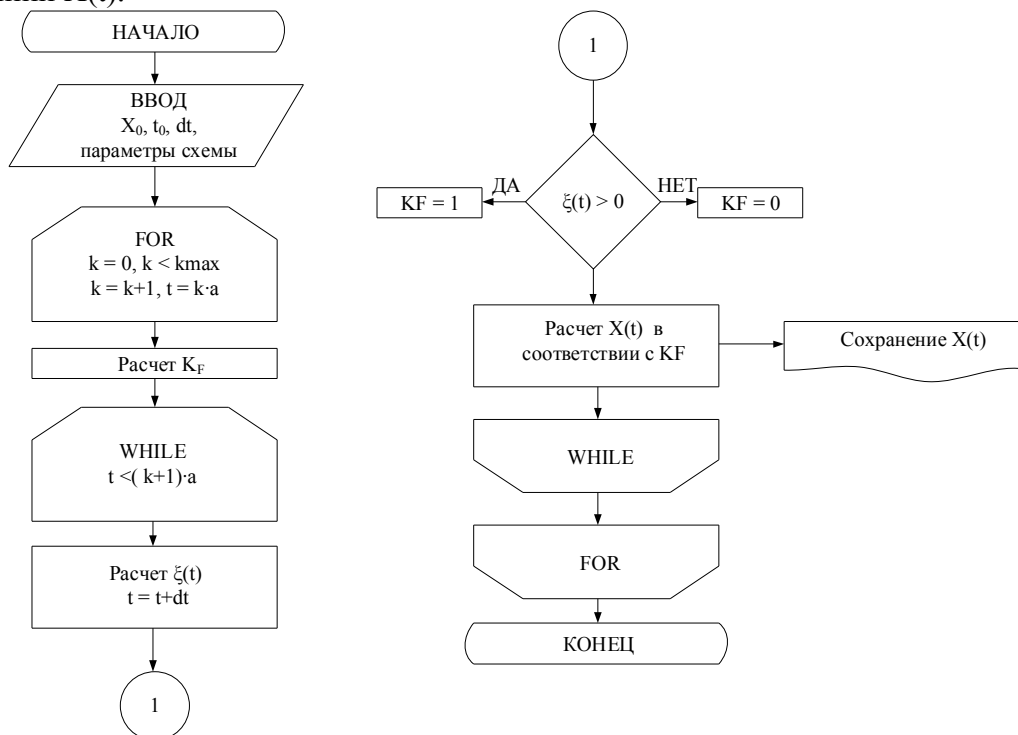


Рис. 2. Упрощенная блок-схема алгоритма получения решения системы нелинейных дифференциальных уравнений

Результаты моделирования бифуркационных явлений, встречающихся в модели преобразователя, описанного выражением (1) для различных значений коэффициента усиления  $\alpha$  пропорционального регулятора, приведены на рис. 3.

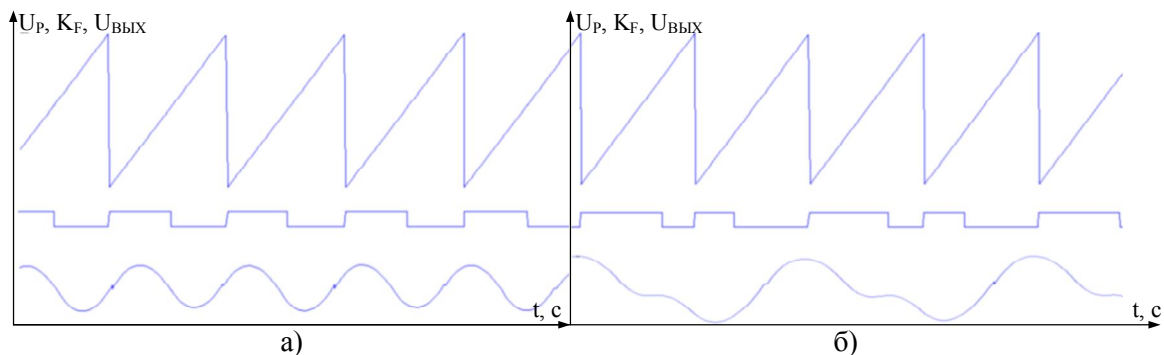


Рис. 3. Результаты моделирования: а)  $\alpha = 50$ ; б)  $\alpha = 100$

Разработанная математическая модель:

- позволяет получить точное решение системы уравнений (1), так как отсутствует погрешность численного метода. Выражения (3,5) являются точным аналитическим решением, а точность построения вектора  $X$  зависит лишь от разрядности представления числа в ЭВМ;
- может использоваться для обнаружения различных, как детерминированных, так и аномальных режимов работы понижающего преобразователя напряжения;
- позволяет исследовать переходы от одной топологической формы выходного сигнала к другой (рис.3) и анализировать причины, вызывающие бифуркационные явления подобного рода.

Исследование динамических режимов замкнутых импульсно-модуляционных систем регулирования, описываемых нелинейными уравнениями кусочно-непрерывного типа, представляет собой самостоятельную задачу для каждого вида преобразователя, различных видов регулятора, коммутационных функций и нагрузки [5, 6, 8]. В работе приводится методика и математическая модель, позволяющие проводить исследования динамики, в том числе и бифуркационный анализ.

Выводы:

Полученные результаты подтверждают возможность создания программно – аппаратных комплексов, быстродействие которых на порядок и более превосходит известные численные комплексы программ, а точность расчетов является предельной и ограничивается лишь ошибкой представления числа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алейников О.А. Исследование локальной устойчивости периодических режимов в нелинейных импульсных системах / О.А. Алейников, В.С. Баушев, А.В. Кобзев, Г.Я. / Электричество. – 1991. – № 4. – 16-21 с.
2. Гавриш П.Е., Михальченко С.Г., Михальченко Г.Я. [Математические модели скоростных подсистем электроприводов силового гироскопического прибора // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники](#). 2013. № 4 (30). С. 103-108.
3. Михальченко С.Г., Бородин К.В. Динамические режимы функционирования преобразователя напряжения с частотно-импульсной модуляцией // Доклады

- Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-1. С. 278-287.
4. Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г., Обрусник В.П. Проблемы анализа динамических режимов функционирования устройств силовой электроники модульного типа // Ползуновский вестник. 2012. № 3-2. С. 107-116.
  5. Кобзев А.В. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей (монография) / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, А.И. Андриянов // Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007, – 224 с.
  6. Михальченко С.Г. Функционирование импульсно-модуляционных преобразователей в зонах мультистабильности // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-1. С. 259-268.
  7. Михальченко С.Г. Анализ динамических режимов функционирования модульных устройств силовой электроники // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-1. С. 269-277.
  8. Гаврилов А.А., Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г. Нелинейная динамика преобразователей с многофазной импульсной модуляцией // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2009. Т. 2. С. 171-178.

#### **АНТИРЕЗОНАНСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 кВ**

Зарипов Р.Ф., Гусаков Д.В., Хафизов Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Трансформаторы напряжения (ТН) в электрических сетях 6–10 кВ обеспечивают безопасность измерений, питание средств учета электроэнергии, контроль изоляции оборудования, питание оперативных цепей, цепей сигнализации, автоматики и релейной защиты. Большинство расчетных счетчиков смонтировано на присоединениях 6–10 кВ. Поэтому для обеспечения надежности и точности работы к ТН 6–10 кВ предъявляются повышенные требования. В первую очередь это относится к ТН контроля изоляции, которые, кроме всех перечисленных функций, должны обеспечивать защиту от повреждений при феррорезонансных процессах.

Антирезонансным называют электромагнитный заземляемый ТН, устойчиво работающий при наличии в сети непрекращающихся феррорезонансных явлений и не вызывающий их. [1] Такие ТН дороже обычных. Поэтому их нужно применять только там, где это дает экономический эффект за счет снижения повреждаемости. Технические требования, дополнительно предъявляемые к антирезонансным ТН по сравнению с ГОСТ 1983–2001, зависят от характера феррорезонанса в той сети, для которой они предназначены.

Сети 6-35 кВ достаточно многочисленны – генераторные, собственных нужд станций, городские кабельные, сельские воздушные, карьерные и др. Они различаются способом заземления нейтрали, допустимым временем существования однофазных замыканий на землю и т.д., что приводит к большому разнообразию устойчивых феррорезонансных процессов или их возможному отсутствию.

К антирезонансным ТН, предназначенным для работы в этих сетях, предъявляются следующие требования, основанные на анализе встречающихся феррорезонансных явлений:

- не вызывать самим устойчивого феррорезонанса;
- не повреждаться при длительных однофазных замыканиях сети на землю через перемежающуюся дугу;
- не повреждаться при устойчивом феррорезонансе емкости сети с нелинейной индуктивностью других трансформаторов. [2]

В настоящее время выпускаются две разновидности масляных антирезонансных ТН. Первая – это НАМИ-10-95 и НАМИ-35, вторая – НАМИТ-10 [3]. Обе предусматривают наличие в одном баке двух трансформаторов – трехфазного и однофазного. Однофазный трансформатор за счет большого количества витков обладает почти линейной кривой намагничивания и большим индуктивным сопротивлением. Его первичная обмотка включена между нейтралью обмоток трехфазного трансформатора и землей. Антирезонансные свойства НАМИ в основном обеспечиваются компенсационной обмоткой, соединенной в треугольник и замкнутой накоротко. Магнитопровод трансформатора НАМИ-10, включаемого на линейные напряжения, собран из пластин электротехнической стали. Магнитопровод заземляющего трансформатора собран из пластин конструкционной стали. На стержнях магнитопроводов расположены обмотки с изоляцией. Магнитопроводы с насаженными на них обмотками помещены в бак, залитый трансформаторным маслом. Бак трансформатора сварен из листовой стали. Отличаются масляные трансформаторы тем, что у НАМИ вторичная обмотка однофазного ТН всегда разомкнута, а у НАМИТ в нормальном режиме она короткозамкнута и размыкается только при феррорезонансе в сети.

Кроме масляных ТН, в России выпускается литая трехфазная группа ТН типа ЗНОЛ.06, ЗНОЛП напряжением 6–10 кВ. Антирезонансные свойства этой группе придает введение в нейтраль первичной обмотки дополнительного резистора сопротивлением 800–1000 Ом [4,5]. Если говорить о трансформаторах с литой изоляцией в целом, то они имеют неоспоримые преимущества перед масляными трансформаторами, а именно: меньшие массу и габаритные размеры; возможность установки в любом положении; пожаробезопасность, герметичность конструкции. Трансформаторы напряжения могут выполняться с одним или двумя высоковольтными вводами первичной обмотки. У заземляемых трансформаторов один ввод первичной обмотки, имеющий неполную изоляцию, во время работы должен быть заземлен. Вводы первичной обмотки незаземляемых трансформаторов напряжения имеют полную изоляцию. Явление феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью достаточно хорошо изучено и предусмотрен ряд мер для его предотвращения или демпфирования. В трехфазных группах 3хЗНОЛ.06 и 3хЗНОЛП для борьбы с феррорезонансами сети нейтраль первичной обмотки, соединенной в звезду, заземляется через три параллельно соединенных резистора, которые ограничивают токи, протекающие через трансформатор при феррорезонансе. Также для повышения устойчивости к феррорезонансу в дополнительные обмотки, соединенные в разомкнутый треугольник, используемые для контроля изоляции сети, рекомендуется включать резистор сопротивлением 25 Ом. [6]

Трехфазная группа трансформаторов напряжения НАЛИ-СЭЦ-6(10) обеспечивает питание приборов учета электроэнергии, аппаратуры, релейных (микропроцессорных) защит и автоматики, а также используется для контроля изоляции в сетях 6(10) кВ с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью. Применяется в комплектных распределительных устройствах внутренней и наружной установки (КРУ) и камерах одностороннего обслуживания КСО.

Изделие состоит из четырех залитых эпоксидным компаундом трансформаторов, закрепленных на установочной раме. Три однофазных измерительных ТН установлены основаниями в ряд. Они имеют по два вывода первичной обмотки, которые расположены на верхней части трансформатора, рассчитанных на полную изоляцию (двухполосные) и удаленных от заземленных частей для уменьшения токов утечки по корпусу трансформатора.

Четвертый трансформатор — трансформатор нулевой последовательности (ТНП), закреплен на трех трансформаторах ТН со стороны выводов первичной обмотки и выполняет функцию защиты измерительного блока литых трансформаторов при феррорезонансе и перемежающихся дуговых замыканиях на землю. Он имеет три плоских контактных вывода первичной обмотки, электрически связанных между собой внутри трансформатора, и заземляемый вывод. Выпускают трехфазные группы НАЛИ-СЭЩ-6(10) в трех вариантах схем соединения обмоток для большей гибкости их использования в электрических сетях.

НАЛИ-СЭЩ-6(10)-1 по схеме соединения обмоток полностью аналогичен трехфазному масляному трансформатору типа НАМИТ-10-2. Вторичная обмотка ТНП в нормальном режиме работы замкнута и размыкается релейной защитой при появлении напряжения небаланса, которое измеряется на выводах дополнительной обмотки, соединенной в разомкнутый треугольник.

НАЛИ-СЭЩ-6(10)-2 — отсутствует дополнительная обмотка, соединенная в треугольник. Вторичная обмотка ТНП всегда разомкнута, и на ее выводах измеряется напряжение контроля изоляции сети. Релейная защита отсутствует.

НАЛИ-СЭЩ-6(10)-3 — имеет замкнутую накоротко дополнительную обмотку, соединенную в треугольник. Вторичная обмотка ТНП всегда разомкнута, и на ее выводах измеряется напряжение контроля изоляции сети. Релейная защита также отсутствует.

Комплектация трехфазных групп НАЛИ-СЭЩ-6(10)-1 и НАЛИ-СЭЩ-6(10)-3 одинаковая, а схема соединения обмоток выбирается потребителем и может быть изменена в процессе эксплуатации. [7]

Как показывает опыт эксплуатации, а также ряд публикаций [2,6,8-9], все вышеуказанные трансформаторы напряжения обладают определенными недостатками. А именно: наличие потока нулевой последовательности, добавочные потери в стали и наличие конструкционной стали, увеличенные массогабаритные показатели из-за применения группы трансформаторов и дополнительного трансформатора, а также у всех ТН наблюдаются частые повреждения при феррорезонансных процессах в электрической сети. Для компенсации феррорезонансных явлений необходимо, чтобы нулевая последовательность в трансформаторе отсутствовала при всех режимах работы. Поэтому наиболее рационально применить такие конструкции, в которых составляющие нулевой последовательности компенсировались бы и, тем самым, уменьшали суммарную индуктивность в стержнях ТН.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1983-2001. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
2. <http://www.news.elteh.ru>
3. Степанов Ю. А, Овчинников А. Г. Трансформаторы напряжения контроля изоляции 6–10 кВ. Сравнительный анализ моделей // Новости ЭлектроТехники. – 2003. – № 6(24).

4. Зихерман М.Х. Трансформаторы напряжения для сетей 6–10 кВ. Причины повреждения // Новости ЭлектроТехники. – 2004. – № 1(25).
5. <http://www.electroshield.ru>
6. <http://www.elec.ru>
7. <http://market.elec.ru>
8. <http://ukrelektrik.com>
9. Кадомская К.П., Лаптев О.А. Предотвращение самопроизвольного смещения нейтрали – задача для разработчиков ТН // Новости ЭлектроТехники. 2009. № 4(58). С. 37.

### **ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА И БАТАРЕИ СТАТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

Суворов А.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Одним из важнейших режимных параметров электроэнергетических систем (ЭЭС) являются напряжения, значения которых в наибольшей мере связано с перетоками реактивной мощности (РМ). Основные средства регулирования напряжения и генерации РМ сосредоточены на электрических станциях, а средств расположенных в электрических сетях недостаточно для регулирования РМ и поддержания напряжения в допустимых пределах. Например, в российских сетях, наиболее распространенными средствами компенсации реактивной мощности (СКРМ) являются шунтирующие реакторы, которые обеспечивают только одноступенчатое регулирование. Эффективным путем решения указанной проблемы является применения устройств FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems - Гибкие системы передачи электроэнергии переменным током), к которым относятся: управляемые шунтирующие реакторы (УШР), статические тиристорные компенсаторы (СТК), статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) и другие [1]. Среди FACTS устройств наиболее распространённым в настоящее время является УШР. В настоящее время разработано два типа управляемых реакторов: УШР трансформаторного типа (УШРТ) и УШР с подмагничиванием (УШРП), в российских сетях наиболее распространены УШРП.

Исследования эффективности применения УШРП и анализ полученных режимов проводились в реально проектируемом в настоящее время энергокластере «Эльгауголь» в ОЭС Восток. Исследуемый энергорайон, как и любая современная ЭЭС, образует большую, нелинейную, динамическую систему. Проектирование, исследование и эксплуатация таких систем является трудной задачей из-за сложности получения достоверной и своевременной информации о протекающих процессах в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах. Получение информации о протекающих процессах в ЭЭС путем натурных испытаний, за редким исключением, недопустимо, а из-за сложности ЭЭС невозможно полноценное физическое моделирование. В результате основным путем получения необходимой информации об ЭЭС является математическое моделирование [2]. Моделирование исследуемой ЭЭС проводилось на Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем, который был создан в Энергетическом институте Томского политехнического

университета [3]. Целью работы является исследование эффективности применения УШРП для регулирования напряжения и РМ, что позволит:

1. Поддерживать допустимый уровень напряжения в ЭЭС;
2. Снизить потери электроэнергии при ее транспортировке и распределении;
3. Оказать положительное влияние на режимы работы энергорайона и энергосистемы в целом.

Целью первого эксперимента было исследование применения УШР для поддержания напряжения в узле нагрузки при работе электрооборудования по реальному суточному графику активной и реактивной нагрузки горнодобывающего предприятия. Для оценки влияния УШР в данном эксперименте осциллографировались процессы при включенных (рисунок 1), а затем при отключенных (рисунок 2) СКРМ. В исследуемом энергорайоне совместно с УШРП установлено две батареи статических конденсаторов (БСК) для генерации РМ. Как видно из диаграмм на рисунке 1, при увеличении нагрузки «отрабатывают» заданные уставки по напряжению, разгружая реактор по мощности. При достижении максимальной нагрузки происходит форсированная разгрузка реактора, благодаря этому напряжение на шинах нагрузки не выходит из допустимой 5-ти процентной зоны от уставки, перебоя в питании потребителей не произошло.

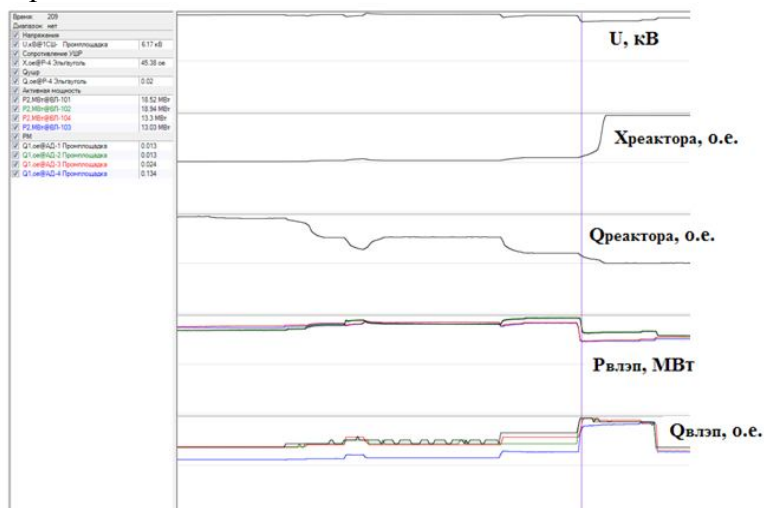


Рис. 1. Осциллограммы изменения нагрузки при включенных УШР и БСК на ПС Эльгауголь

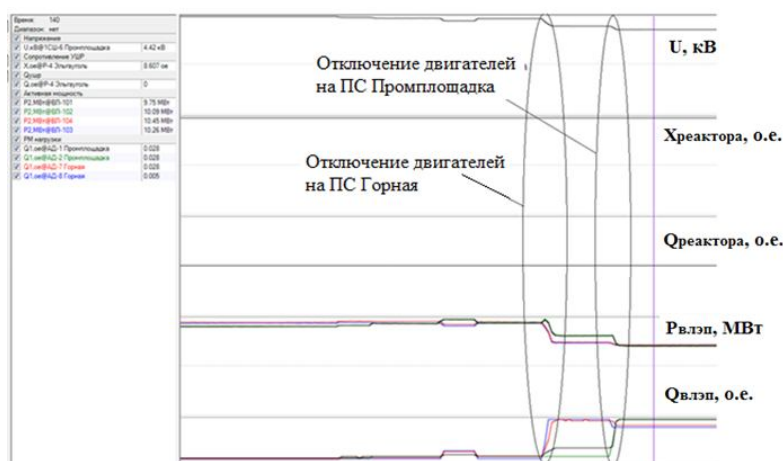
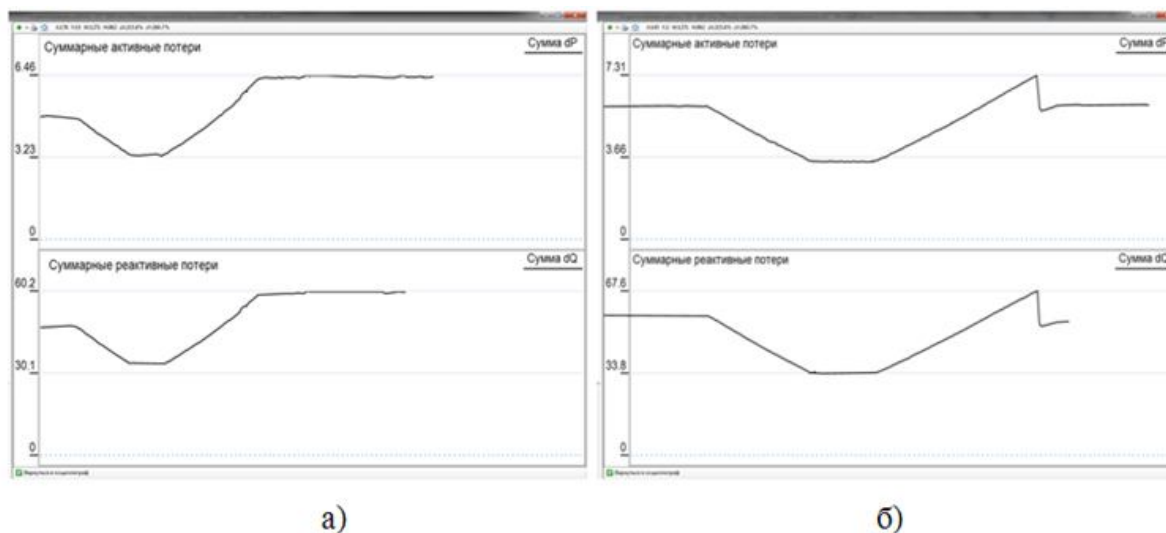


Рис. 2. Осциллограммы изменения нагрузки при выключенных УШР и БСК на ПС Эльгауголь



Согласно рисунку 2, во время набора нагрузки произошло значительное снижение напряжения, что, в конечном счете, привело к остановке двигателей на ПС Промплощадка и ПС Горная, питаемых от шин 110 кВ ПС Эльгауголь, где установлены СКРМ. Вследствие этого активная мощность линий отходящих от шин 110 кВ ПС Эльгауголь резко уменьшилась, а реактивная мощность увеличилась. Таким образом, подводя итоги экспериментов, продемонстрированных на рисунках 1 и 2, можно сделать вывод о том, что от УШР зависит бесперебойность питания ключевых потребителей энергокластера «Эльгауголь».

При исследовании влияния СКРМ на потери снимались показания потерь активной и реактивной мощности линий электропередач и трансформаторов энергокластера при работе электрооборудования по заданному графику нагрузки. Полученные диаграммы представлены на рисунке 3. Представленные результаты показывают, что активные и реактивные потери в энергокластере при отключенных СКРМ выше, чем при их функционировании.



**Рис. 3.** Осциллограммы суммарных текущих потерь в энергокластере при  
а) функционирующих СКРМ б) отключенных СКРМ

#### Закключение.

В настоящее время регулирование уровня напряжения и генерация РМ в электрических сетях осуществляется с помощью шунтирующих реакторов, конденсаторных батарей, коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, которые могут обеспечить только ступенчатое регулирование, которого оказывается недостаточным для поддержания уровня напряжения в допустимых пределах. В связи с этим обоснованным и целесообразным становится рассмотренный в работе подход к решению проблемы, который заключается в применении УШР и БСК, которые позволяют производить автоматическое плавное регулирование напряжения и РМ. В результате исследований установлено, что совместное применение УШР и БСК позволит:

1. Поддерживать допустимый уровень напряжения в ЭЭС в нормальных режимах;
2. Снизить потери мощности в энергокластере;
3. Оказать положительное влияние на режим работы ЭЭС.

Однако было установлено, что в аварийных режимах УШР в силу своей инерционности, не всегда способен обеспечить устойчивость узлов нагрузки. Это зависит от многих факторов, например от места короткого замыкания, от времени

работы защиты, от длительности АПВ и др. Поэтому в некоторых случаях целесообразно использовать более быстродействующее устройство, например такое как статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: Торус Пресс, 2011. – 326 с.
2. Веников В.А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. – М.: Высшая школа, 1966. – 487 с.
3. Боровиков Ю. С., Гусев А. С., Сулайманов А. О. Принципы построения средств моделирования в реальном времени интеллектуальных энергосистем // Электричество. – 2012. – №6. – С. 10-13.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ГОРЕНИЕ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Кузнецов А.В., Бугаков Е.Б.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СОРАН, г. Новосибирск

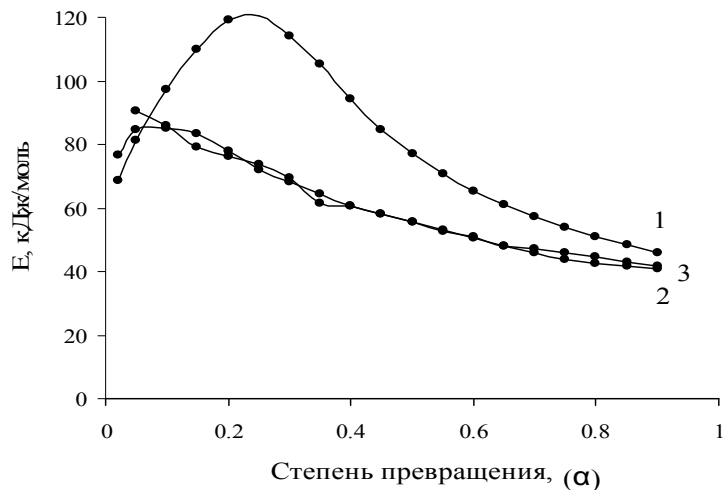
Для реализации механической активации требуется воздействие на твердое топливо внешних сил, в угольном топливе используются различные типы измельчения, в результате которых осуществляется уменьшения характерных размеров, что увеличивает площадь реакционной поверхности, а также изменения химической активности топлива. При создании системы механоактивационного измельчения решающим фактором является выбор наиболее эффективного и технически достаточно простого реализуемого способа измельчения, позволяющего максимально увеличить химическую активность топлив. Для решения этой проблемы было проведено исследование влияния способов измельчения углей различных стадий метаморфизма в энергонапряженных мельницах различного типа – виброцентробежных, планетарных, дезинтеграторах. На первом этапе нами использовались методы дифференциально-термического анализа, позволяющие исследовать в процессе термического разложения реакционных свойств углей, подвергнутых механохимической обработке.

Этот метод позволяет анализировать процессы термоокислительной деструкции (ТОД) угольного вещества, нагреваемого со скоростью 10-30<sup>0</sup>С в минуту, что, конечно, отличается от реального нагрева, воспламенения и горения частиц в пылеугольном факеле в топочной камере.

В качестве объектов исследования использованы пробы углей Кузнецкого угольного бассейна марок Д и Т с зольностью  $A^c = 6.46\%$  и  $6.15\%$  и выходом летучих компонентов  $V^{daf}$  - 41% и 12.4% соответственно. Пробы подвергались сверхтонкому диспергированию в мельницах, отличающихся видом механических воздействий – использовался дезинтегратор, для которого характерно ударное разрушение и центробежно-планетарная мельница типа М-3 с истирающе-раздавливающим видом воздействия при отношении массы мелющих тел к углю 10:1.

На рис. 1 приведены кривые изменения энергии активации процесса ТОД. Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что интенсивная механическая обработка высокометаморфизованного тощего угля повышает его реакционную способность, проявляющуюся в снижении величины энергии активации

по всему температурному интервалу термоокислительной деструкции. Однако степень снижения величины этого показателя по сравнению с низко метаморфизованным длиннопламенным углем существенно ниже.

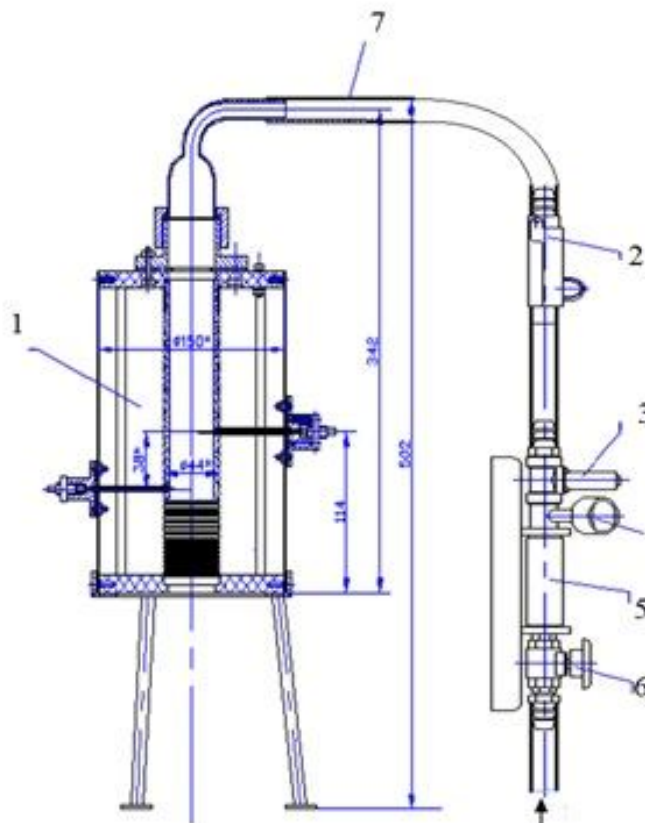


**Рис. 1.** Изменение энергии активации длиннопламенного угля в процессе термоокислительной деструкции. 1- исходный образец; 2 – обработанный в дезинтеграторе; 3 - легкая фракция ( $d < 1.4 \text{ г/см}^3$ )

Анализируя данные дифференциально-термического анализа углей различных стадий метаморфизма, следует отметить, что в начальной стадии термического разложения значения энергии активации в ряде случаев (рис. 1) у исходного и механоактивированного углей могут быть близки и существенное изменение энергии активации  $E$  наблюдается после  $\sim 20\%$  степени термического разложения. В связи с этим оценка влияния эффекта механоактивации углей должна производиться по результатам реагирования не только в начальной стадии процесса, но и в значительной части (до 50%) процесса выгорания пылевзвеси.

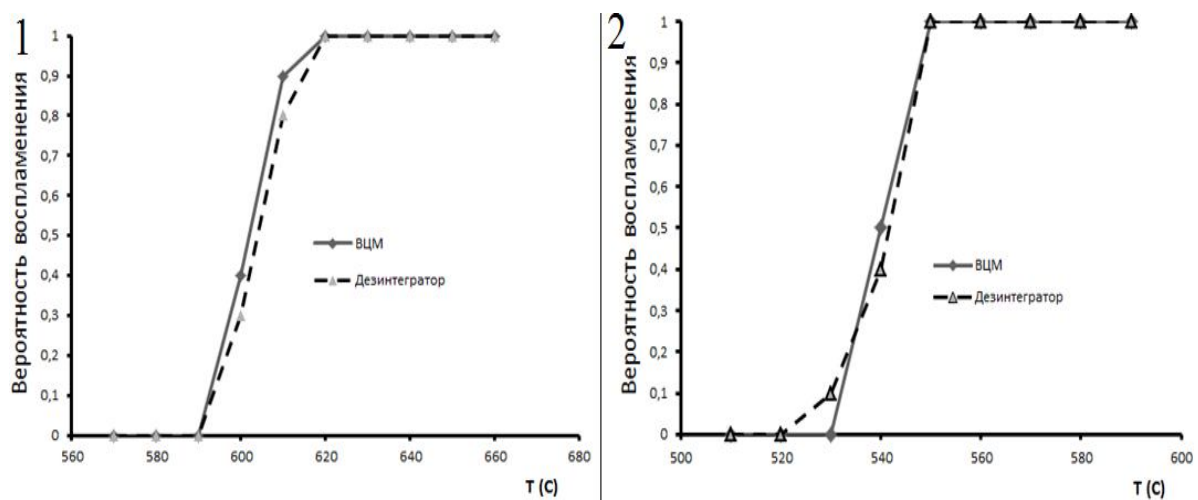
Время анализа при использовании методики ДТА – достаточно большая величина, в течение которого возможно изменение термических свойств углей, прошедших механохимическую активацию. В связи с этим нами была разработана методика и создана экспериментальная установка по определению кинетических характеристик углей микропомола на основе изменения температуры вспышки навески угля в пылевзвеси, т.е. в начальной стадии воспламенения факела. Схема стенда представлена на рис. 2. Используются угли прошедшие обработку на дезинтеграторе и виброцентробежной мельницы с похожим спектром размеров. В эксперименте использовались Кузнецкий (Белово) газовый и Бурый уголь, с высоким выходом летучих.

Условия проведения экспериментов соответствовали теоретической модели процесса: начальные температура воздуха и стенок камеры были одинаковыми. Угольная пыль в камеру сгорания подаётся импульсным питателем позволяющим навеске пыли в камере сгорания двигаться со скоростью витания. Контролируется температура в камере сгорания и момент воспламенения, а также измеряется время нахождения угольной пыли в печи до момента вспышки.



**Рис. 2.** Экспериментальный стенд по воспламенению угольной пылевзвеси.  
 1 - печь, 2 – держатель пыли, 3 – электромагнитный клапан, 4 – манометр, 5 – газовый баллон, 6 – шаровой клапан, 7 – шланг

Для каждой пробы угля проводится серия экспериментов из 10 опытов при постоянной температуре. В дальнейшем осуществляется понижение температуры на 10 градусов.



**Рис. 3.** Зависимость вероятности воспламенения от температуры 1) длиннопламенного угля Кузнецкого месторождения, 2) Бурого угля Б2

Из графиков видно, что изменение вероятности воспламенения проходит примерно линейно в зависимости от температуры среды, что не соответствует гетерогенной теории воспламенения [1], если все частицы имеют одинаковую реакционную способность, что описывается уравнением Аррениуса для константы химической реакции уравнение (1).

$$k = \frac{Q_{ген}}{s} = A \exp\left[\frac{-E}{RT_p}\right] \quad (1)$$

Частота воспламенения была бы равна 0% при температурах меньше критической. При температурах равных или больших чем критическая частота воспламенения равнялась бы 100%. Что не раз показывалось в исследованиях с лазерным излучением.[1]

Линейная зависимость объясняется тем, что в эксперименте, где участвует большое количество частиц, увеличивается вероятность, что хотя бы у части частиц реакционная способность соответствует или превышает критическое состояние необходимое для воспламенения. Данные критические условия описываются уравнениями (2) и (3), являющимися основными условиями в гетерогенной теории воспламенения, которые и объясняют данную линейную зависимость [2].

$$\frac{Q_{ген}}{s} = Q_{крит} \quad (2)$$

$$\frac{dQ_{ген}}{dT} = \frac{dQ_{крит}}{dT} \quad (3)$$

где  $Q_{ген}$  – генерируемое количество теплоты в результате воспламенения частицы,  $Q_{крит}$  – потеря количества теплоты,  $T$  – температуры частиц.

Получены первые данные по температуре вспышки подтверждают работоспособность методики, однако для дальнейших исследований кинетики воспламенения пылевзвеси углей на основе определения температуры вспышки пылевзвеси углей различной стадии метаморфизма и методов механоактивационного измельчения требуются подробные исследования с определением влияния различных факторов подготовки углей и времени реагирования. Следует также одновременно продолжать исследования по дифференциально-термическому анализу образцов после механического измельчения. Судя по данным рисунка 2, в начальной стадии термического разложения энергия активации исходного и механоактивированного углей может отличаться незначительно. Это может объяснять полученные результаты по воспламенению угольной пыли, где мы видим незначительное отличие для пыли после виброцентробежной мельницы и дезинтегратора, так как воспламенение рассматриваемых углей в первую очередь определяется выходом летучих веществ. Это показывает необходимость дальнейшего развития методики сжигания пылевзвеси после вспышки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Essenhigh, R. H., Mahendra, K. M., and Shaw, D. W., Combust. Flame 77:3-30 (1989).
2. Chen, J., Taniguchi, M., Narato, K., and Ito, K., Combust. Flame 97:107-117 (1994).

*«Работа и представление доклада проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Соглашение о субсидии N14.613.21.0005».*

## ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НЕГОРЮЧИХ КАБЕЛЕЙ

Лазарева Н.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Снижение воспламеняемости и горючести полимеров и создание пожаробезопасных материалов, в том числе для кабельной индустрии — актуальная проблема, требующего неотложного решения. Во многих развитых странах приняты специальные постановления о запрещении или ограничении использования горючих полимерных материалов в строительстве промышленных и жилых сооружений, в производстве самолетов, автомобилей, судов и ж/д вагонов, электротехнике и электронике и т.д. [1].

Показатели пожарной безопасности кабелей определяют в основном правильным выбором материалов изоляции и защитных покровов, а также зависят от конструктивного исполнения кабелей.

Горючесть в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89 (Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения) характеризует способность материала к горению. При этом выделяются материалы: негорючие — не способные к горению в воздухе; трудногорючие — способные возгораться в воздухе, не способные самостоятельно гореть после удаления источника зажигания; горючие — способные самовозгораться, а также самостоятельно гореть после удаления источника зажигания.

Следует отметить, что существующие количественные показатели горючести материалов часто не могут быть увязаны с показателями пожарной безопасности кабеля и поэтому не находят широкого применения при их конструировании. Наибольшее распространение для оценки горючести получил показатель «кислородный индекс» (КИ). Кислородный индекс материала равен минимальному объему кислорода в кислородно-азотной смеси, при котором возможно устойчивое горение материала в условиях испытаний.

Как показывает опыт, можно утверждать, что все материалы с  $КИ < 21$  являются горючими материалами, т.е. могут самостоятельно гореть на воздухе после удаления источника зажигания. Полимеры, имеющие  $КИ < 27$ , считаются легкогорючими. Полимеры считаются трудногорючими материалами и являются самозатухающими при выносе их из огня, если их  $КИ > 27$ .

**Таблица 1.** Значения КИ материалов, применяемых для производства кабелей

Название материалов	КИ материалов
ПВХ-пластикат пониженной горючести	32—40
ПВХ (смола)	45
Полиэтиленвинил ацетат	52
Полиимид	36
Фторопласт-4	95-96
Фторопласт-4МБ	95
Фторопласт-2М	43-44
Фторопласт-40	30-31

Наименее горючий из этих материалов — ПВХ-пластикат, что можно объяснить его химической структурой (наличие атомов хлора и отсутствие двойных связей). При пожаре происходит разложение пластиката с выделением  $HC1$ . Это препятствует распространению пламени, однако при контакте с водой или водяными парами  $HC1$  образует соляную кислоту, обладающую сильными коррозионными свойствами.

Газообразный HCl оказывает отрицательное действие на организм человека. Высокое дымо- и газовыделение ограничивает применение обычных изоляционных и шланговых рецептур ПВХ-пластиката для огнестойких и нераспространяющих горение кабелей.

Стойкость ПВХ к действию пламени можно увеличить специальным подбором ингредиентов. Так, в ПВХ-пластикаты пониженной горючести вводят антипирены (вещества, снижающие горючесть), фосфатные пластификаторы, специальные наполнители. Эти ингредиенты не только снижают горючесть пластиката, но и уменьшают дымо- и газовыделение при пожаре благодаря тому, что они вступают в химическую реакцию с HCl, связывают его и переводят в негорючие продукты, остающиеся в золе.

Высокой огнестойкостью обладают полимеры на основе тетрафторэтилена и другие фторполимеры. Эти материалы обладают одним из самых высоких кислородных индексов и низким дымо- и газовыделением. Тем не менее, следует иметь в виду, что при температуре выше 300 °С эти материалы выделяют высокотоксичные продукты, которые поражающе действуют на человеческий организм и выводят из строя электрооборудование [2].

Некоторые практические разработки в области электроизоляционных полимерных материалов с повышенной негорючестью. Анализ зарубежной практики и накопленный собственный опыт позволяют заключить, что большой интерес для кабельной и других отраслей промышленности представляют термопластичные эластомеры (ТПЭ) сочетающие свойства резин с возможностью переработки на оборудовании, предназначенном для переработки пластмасс. Это обусловлено простотой и высокой скоростью технологического процесса наложения ТПЭ на жилу, прекрасными эксплуатационными характеристиками компаундов, а также полной утилизируемостью при переработке. При этом особую практическую ценность и перспективу имеют материалы с повышенной сопротивляемостью к воздействию окружающей агрессивной среды в широком интервале температур (от -50 до +160 °С).

Сегодня за рубежом выпускается широкий спектр ТПЭ, обладающих разнообразным комплексом важных эксплуатационных свойств, в том числе агрессивно-стойкие негорючие материалы категории halogen free. Фирмы Teknog Apex, GLS, Kreiburg и другие предлагают новые современные марки ТПЭ с повышенной стойкостью к нефтепродуктам и негорючими характеристиками на базе безгалогенсодержащих антипиренов.

В России промышленное производство ТПЭ только зарождается. На рынке практически полностью отсутствуют отечественные негорючие марки этих материалов.

В рамках НИОКР, проводимых совместно с ЗАО «НПК Полимер-Компаунд» (г. Томск), ВНИИКП и производителями кабельной продукции за последнее время было разработано и внедрено в промышленное производство несколько новых марок термоэластопластов [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. [http://www.kabel-news.ru/netcat\\_files/90/100/june\\_R.I.\\_Ableev\\_doklad.pdf](http://www.kabel-news.ru/netcat_files/90/100/june_R.I._Ableev_doklad.pdf)
2. <http://leg.co.ua/info/kabeli/nerasprostranyayuschie-gorenie-i-ognestoykie-silovye-kabeli.html>

## ОБ УЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Несветаило М.В.

Омский государственный технический университет, г. Омск

Задачи учета электроэнергии разнообразны. В настоящее время возникла необходимость в точном учете выработанной и потребленной энергии, оперативном контроле использования энергоресурсов, анализе и прогнозировании их потребления, выработке эффективной энергосберегающей политики.

Учет электрической энергии (ЭЭ) – процесс измерения потребленной энергии счетчиками ЭЭ, являющихся интегрирующими приборами. Показания счетчиков зависят от времени, за которое производится измерение. Можно считать, что счетчик вычисляет энергию по формуле:

$$W = \int_0^T P dt, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность [кВт];  $T$  – время [ч];  $W$  – энергия [кВт-ч].

В последнее время возросло использование трехфазных счетчиков ЭЭ за счет их многофункциональности, сокращения расходов на потребление ЭЭ в быту. Использование данных счетчиков вызвано необходимостью измерения активной и реактивной ЭЭ.

Различаются трехфазные счетчики по схемам подключения:

1. Счетчики непосредственного (прямого) включения подключаются аналогично однофазным напрямую в сеть 220/380 В и рассчитаны на протекание тока до 100 А. Клеммная колодка счетчиков прямого включения и отверстия под провода рассчитываются на незначительное сечение проводов (16 – 25 мм<sup>2</sup>). Схема подключения указана на обратной стороне крышки счетчика.
2. Счетчики полукосвенного подключения включают через трансформаторы тока (ТТ), что позволяет вести учет ЭЭ с существенными мощностями в сети. При подсчете использованной ЭЭ стоит учитывать коэффициент трансформации. Существуют различные схемы полукосвенного включения, среди которых: схема подключения ТТ по типу «звезда», десятипроводная схема, с совмещенными цепями по току и напряжению.
3. Счетчики косвенного включения используют для учета ЭЭ исключительно для высоковольтных соединений промышленного назначения 6 (10) кВт.
4. Счетчики с учетом реактивной составляющей в настоящее время не применяются.

Установка, монтаж, регистрация счетчиков производится с разрешения организаций, обладающих лицензией, предоставляющей право на ведение электромонтажных работ.

Схема подключения трехфазных счетчиков зависит от типа счетчика. Тем не менее, они поддерживают формат однофазного измерения.

Традиционные схемы подключения трехфазного счетчика в сеть напряжением 380/220 В и счетчики постепенно уступают место более совершенным электроприборам. Например, трехфазным счетчикам ЭЭ серии СЕ, которые имеют расширенные функциональные возможности микропроцессорного многотарифного счетчика. В данных устройствах учет ЭЭ и мощности производится по нескольким суточным тарифам и предусматривает несколько графиков тарификации. Замену и установку трехфазного счетчика не стоит делать, достаточно вызвать специалиста, который произведет перепрограммирование режимов работы. Учет ЭЭ осуществляется с высоким классом точности (0,5 – 1,0), хищение ЭЭ исключено, т.к. два уровня доступа защищены пользовательским паролем. Данный прибор учета работоспособен при скачкообразных режимах и нагрузках сети.



В договоре энергоснабжения (купли-продажи) ЭЭ указан порядок определения приборов учета, показания которых используются при определении объемов потребления ЭЭ (мощности), оказанных услуг по передаче ЭЭ, за которые осуществляются расчеты по договору.

На территориях субъектов РФ, объединенных в ценовые зоны оптового рынка, ЭЭ (мощность) продается по нерегулируемым ценам, за исключением продажи ЭЭ (мощности) населению и приравненным к нему категориям потребителей [1]. Если же субъекты РФ не объединены в ценовые зоны оптового рынка, ЭЭ (мощность) продается по регулируемым ценам.

В 442 Постановлении [1] определен порядок определения и применения гарантирующими поставщиками предельных уровней нерегулируемых цен на ЭЭ (мощность) и структура нерегулируемых цен на ЭЭ (мощность). Согласно [1] предельные уровни нерегулируемых цен на ЭЭ (мощность) за соответствующий расчетный период рассчитываются гарантирующим поставщиком по следующим ценовым категориям:

- первая ценовая категория – для объемов покупки ЭЭ (мощности), учет которых осуществляется в целом за расчетный период;
- вторая ценовая категория – для объемов покупки ЭЭ (мощности), учет которых осуществляется по зонам суток расчетного периода;
- третья ценовая категория – для объемов покупки ЭЭ (мощности), в отношении которых осуществляется почасовой учет, но не осуществляется почасовое планирование, а стоимость услуг по передаче ЭЭ определяется по тарифу на услуги по передаче ЭЭ в одноставочном выражении;
- четвертая ценовая категория – для объемов покупки ЭЭ (мощности), в отношении которых осуществляется почасовой учет, но не осуществляется почасовое планирование, а стоимость услуг по передаче ЭЭ определяется по тарифу на услуги по передаче ЭЭ в двухставочном выражении;
- пятая ценовая категория – для объемов покупки ЭЭ (мощности), в отношении которых за расчетный период осуществляются почасовое планирование и учет, а стоимость услуг по передаче ЭЭ определяется по тарифу на услуги по передаче ЭЭ в одноставочном выражении;
- шестая ценовая категория – для объемов покупки ЭЭ (мощности), в отношении которых за расчетный период осуществляются почасовое планирование и учет, а стоимость услуг по передаче ЭЭ определяется по тарифу на услуги по передаче ЭЭ в двухставочном выражении.

Существуют общая задача учета ЭЭ на федеральном оптовом рынке ЭЭ и мощности, задачи учета ЭЭ на электростанциях, предприятиях электрических сетей, межсистемных перетоков, учет в мелкомоторном, коммунальном и бытовом секторах.

Расчетным (коммерческим) учетом ЭЭ называется учет поставки (потребления) ЭЭ для денежного расчета за нее. Для коммерческого учета характерно небольшое количество точек учета, по которым устанавливаются приборы повышенной точности.

Коммерческий учет ЭЭ ведется по таким тарифам, как: оптовый (почасовой), двухставочный, одноставочный, дифференцированный по зонам суток.

Приборы учета выбираются из государственного реестра измерительных средств. Счетчики, устанавливаемые для расчетного учета, называются расчетными счетчиками ЭЭ. Коммерческие счетчики должны выполнять функции накопления, хранения, кодирования информации и с заданным интервалом времени автоматически передавать в устройства сбора и хранения данные коммерческого учета и информацию об учтенной ЭЭ, зафиксированную на каждый заданный момент замера мощности [2]. Они

устанавливаются на границе раздела сети электроснабжающей организации и потребителя и в точках купли – продажи ЭЭ субъектами рынка ЭЭ.

Системы коммерческого учета пломбируются, благодаря чему внести какие-либо оперативные изменения персоналом предприятия становится затруднительно.

Техническим (контрольным) учетом ЭЭ называется учет для контроля расхода ЭЭ в зданиях, внутри предприятий, по подразделениям и объектам. Для технического учета характерно наличие большого количества точек учета с разными задачами контроля ЭР, благодаря чему появляется возможность установки приборов пониженной точности. Допускается использование приборов учета, не отнесенных к государственному реестру измерительных приборов. Счетчики, устанавливаемые для технического учета, называются счетчиками технического учета.

Пломбы отсутствуют, благодаря чему появляется возможность внесения изменений в схему технического контроля ЭР, а также в уставки первичных измерительных приборов.

Перераспределение потребления ЭЭ в течении суток – эффективный способ снижения затрат. Цена за единицу мощности велика в моменты «часов пик», когда нагрузка достигает максимума. Цена же за полупиковые часы и ночные ниже, поэтому задача предприятия – перераспределить нагрузку на эти часы.

Функции расчетного и технического учета могут быть совмещены в рамках одной системы. Таким образом, коммерческий и технический учет могут быть реализованы и как отдельные системы, и как единая система. Объединение систем коммерческого учета и технического учета в одну достаточно эффективно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: Постановление Правительства Российской Федерации от 4 мая 2012 г. N 442.
2. Пункты установки средств учета электроэнергии. [Электронный ресурс]. – URL: [http://electro.narod.ru/information/supply\\_meter.htm](http://electro.narod.ru/information/supply_meter.htm) (дата обращения: 27.01.2014).

#### **ВЫБОР УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Воронин К.А., Рахманова Ю.В.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Вопрос компенсации реактивной мощности в рамках программ, направленных на энергосбережение и оптимизацию работы электрических сетей становится все более актуальным. При выборе устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ), необходимыми являются сведения о типах и мощностях компенсаторов. Однако опыт эксплуатации УКРМ показал, что вопрос технического обслуживания и грамотной настройки установки является не менее важным, ведь при ошибочных действиях УКРМ работает неэффективно, фактически не оправдывая вложенных денег, либо и вовсе выходит из строя. Ремонт же порой оказывается невозможным вследствие значительных механических разрушений возникающих при аварии на установке. О том, что влияет на срок жизни УКРМ и как обеспечить их максимально эффективную работу, мы кратко расскажем в данной статье.

Безусловно, первым шагом перед выбором и установкой УКРМ должен быть комплексный анализ качества электрической энергии в сети предприятия, проведенный с помощью современных приборов и дающий реальную картину о поведении, свойствах и потреблении электрической энергии в течении, как минимум 1 рабочей недели.

После получения базы данных по показателям качества электрической энергии перед инженерами встают уже чисто технические вопросы. И начать необходимо с выбора числа ступеней регулирования.

Казалось бы, что если имеется график нагрузки и мощность необходимой УКРМ аналитически рассчитана, то и проблем с выбором числа ступеней регулирования возникать не должно. Однако производитель обычно предлагает различное число ступеней. Это может и 100 кВАр и 50 кВАр и даже 25 кВАр, да и в принципе эта величина не ограничена. Возникает вопрос - а в чем же разница, какой номинал выбрать лучше и правильнее? Если подойти к этому вопросу несерьезно, то, в последствии можно получить очень неприятный экономический «укол» после того, как УКРМ не отработают то время, на которое вы рассчитывали. Выбор «веса» ступеней регулирования влияет на следующие основные показатели:

1. Безаварийный срок эксплуатации конденсаторов;
2. Точность компенсации;
3. Видимый экономический эффект.

Безусловно, на срок эксплуатации УКРМ влияют и другие факторы, и нельзя относиться к правильному выбору ступеней регулирования, как к гаранту абсолютной надежности. Однако становится понятно, что чем больше ступеней регулирования, и чем более чувствительной при настройке становится УКРМ, тем будет эффективнее ее работа. Но следует учитывать, что при увеличении количества ступеней увеличивается и стоимость установки, как и ее типовые размеры.

Оптимальное количество ступеней регулирования определяется на основании:

1. Характера графика нагрузки, т.е. величины и скорости его изменения;
2. Необходимости разряда конденсатора ступени между включениями до максимума 10% от номинального напряжения.

По результатам эксплуатации УКРМ установлено, что существует прямая зависимость между количеством ступеней регулирования, их «весом» и характером графика нагрузки: чем больше колебания нагрузки, тем больше требуется ступеней регулирования, тем больше растет цена УКРМ.

Следующим «подводным камнем» при выборе типа и «начинки» УКРМ являются присутствующие практически в любой сети высшие гармоники. Имели место случаи, когда при аналитически правильном выборе, установки выходили из строя за 5-6 месяцев без явной на то причины. Проведенный анализ показал, что чаще всего причиной «смерти» УКРМ становилось постоянное воздействие на них высших гармоник. А при использовании в УКРМ разрядных резисторов происходит их значительный нагрев и старение. В таких случаях, если анализ качества электрической энергии проведен качественно, то наличие гармоник явно прослеживается на диаграммах, и можно заранее вместо разрядных резисторов включить в состав УКРМ разрядные дроссели, которые могут противостоять воздействию гармоник.

Кроме верного выбора УКРМ, существенное значение имеет и процесс эксплуатации установок непосредственно после ввода в работу. Так, поддержание температурного режима УКРМ является одним из важнейших факторов. Следует понимать, что кроме внешнего температурного воздействия, источники тепла есть и в самой установке. Если распределять их по количеству выделяемого тепла, то получается:

1. Фильтровые дроссели;
2. Конденсаторы;
3. Плавкие вставки;
4. Контактные соединения, провода, шины;
5. Контактторы.

Не секрет, что срок эксплуатации УКРМ существенно зависит от температуры. Вследствие этого, современные установки компенсации имеют системы принудительной вентиляции (охлаждения). Тем не менее, нужно четко понимать при какой внешней температуре будут эксплуатироваться установки, т.к. может потребоваться дополнительное охлаждение.

Если установка модульного типа, то следуют соблюдать несколько правил:

1. Модули желательно не соединять последовательно, т.к. нагрев первых контактных соединений очень высок;
2. Нельзя соединять в жгуты силовые провода.

К сожалению, не всегда сети работают в нормальном и стабильном режиме. Часто возникают перегрузки по току и броски напряжения, которые значительно сокращают срок службы установок. Максимально допустимые броски напряжения приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Зависимость максимально допустимых бросков напряжения и их длительности

Максимальное напряжение	Максимальная длительность
$1,1 \times U_{\text{ном}}$	8 часов / день
$1,15 \times U_{\text{ном}}$	30 минут / день
$1,2 \times U_{\text{ном}}$	5 минут / день
$1,3 \times U_{\text{ном}}$	1 минута / день

Очень опасны для УКРМ броски напряжения. И если они присутствуют в сети постоянно, то, конечно, необходимо каким-либо образом защищать от них УКРМ, например, используя ОПН.

Становится понятно, что обеспечить надежную работу УКРМ можно, если внимательно относиться к выбору параметров и комплектующих. Кроме того, чем выше надежность - тем выше цена.

Если говорить об экономической эффективности от внедрения УКРМ, то здесь все довольно прозрачно.

Компенсация реактивной мощности в сети позволяет:

1. Снизить плату поставщику за потребленную электроэнергию;
2. Уменьшить токовые нагрузки в сети;
3. Улучшить качество электроэнергии.

Проведенные расчеты говорят об оптимистичном сроке окупаемости при внедрении УКРМ. Тем не менее, необходимо руководствоваться в большей степени приносимой пользой, а не экономическим эффектом. Применять УКРМ можно, а главное нужно.

В данной статье авторами была предпринята попытка, оградить инженеров, которые столкнутся с выбором УКРМ от ошибочных решений, которые сократят срок эксплуатации, снижат эффективную работу устройств, нанесут экономический ущерб.

## СРАВНЕНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЫСШИМИ ГАРМОНИКАМИ

Костинский С.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

Известно [1], что источниками высших гармоник (ВГ) являются нелинейные приёмники электроэнергии. Согласно работе [2] предельные дополнительные потери активной мощности, обусловленные ВГ в стали силовых трансформаторах ( $\Delta P_{ВГ}$ ), могут достигать  $1,9 \cdot P_{КЗ}$ , где  $P_{КЗ}$  – мощность потерь короткого замыкания трансформатора при его номинальной нагрузке.

Основными силовыми трансформаторами, эксплуатируемыми в жилом секторе и промышленности, являются масляные трансформаторы. В работе [3] сделан прогноз о востребованности силовых трансформаторов в процентном соотношении для жилого сектора и промышленных потребителей в перспективе до 2020 года, указанный в табл. 1. В этой связи актуален анализ и сравнение номенклатуры выпускаемых на сегодняшний день силовых масляных трансформаторов отечественными производителями и производителями стран СНГ, по критерию предельных относительных потерь активной мощности, обусловленных ВГ.

**Таблица 1.** Прогноз востребованности и распределительных трансформаторов

Мощность, кВА	250	400	630	1000	1600
Доля, %	15	15	35	20	15

Необходимым условием для анализа потерь активной мощности, обусловленных ВГ, является выбор производителей, изготавливающих трансформаторы мощностью от 250 до 1600 кВ·А. В соответствии с вышеперечисленными требованиями, как и в работе [4], были выбраны следующие заводы-изготовители:

1. Минский электротехнический завод им. В.И. Козлова, г. Минск;
2. «Укрэлектроаппарат», г. Хмельницкий;
3. «Алтранс», г. Барнаул;
4. ЭТК «БирЗСТ», г. Биробиджан;
5. Кентауский трансформаторный завод, г. Кентау;
6. ЗАО «Электрощит-ТМ», г. Самара;
7. ОАО «Электрощит» г. Москва;
8. ЗАО «Трансформер», г. Подольск;
9. ЗАО «Завод силовой электроаппаратуры», г. Чебоксары.

Паспортные данные силовых трансформаторов для анализа и расчетов были взяты из официальных сайтов заводов изготовителей.

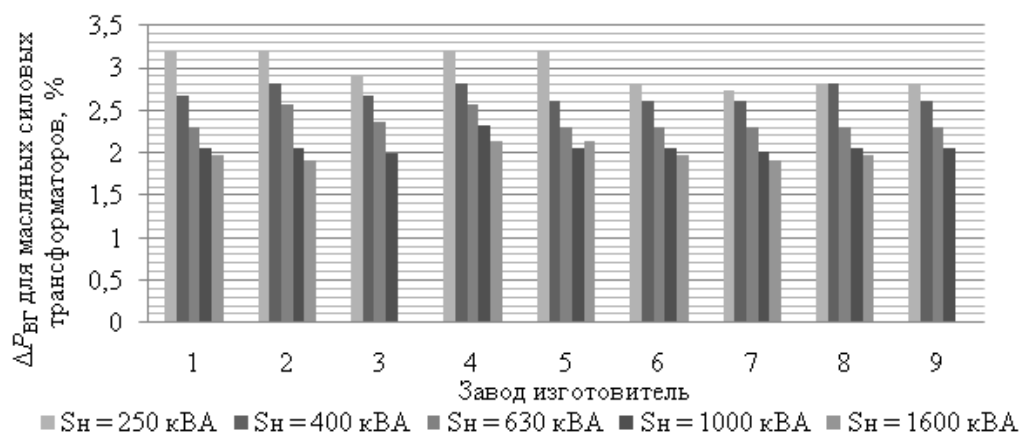
Для серийных масляных трансформаторов до 1600 кВ·А, выпускаемых указанными выше заводами-изготовителями, рекомендации по выбору с учетом потерь активной мощности обусловленных ВГ приведены в табл. 2 и на рис. 1.

В настоящее время потребность в пожаробезопасных, экологически чистых силовых трансформаторах достаточно высока. Поэтому является актуальным вопрос анализа и сравнения номенклатуры выпускаемых на сегодняшний день силовых сухих трансформаторов отечественными производителями и производителями стран СНГ, в

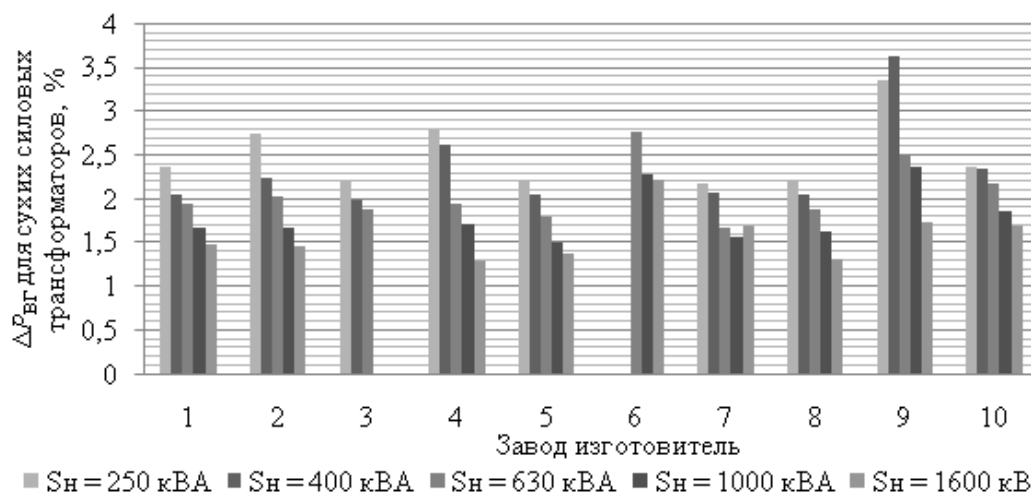
рамках потерь активной мощности обусловленных ВГ. Как и в работе [5], были выбраны следующие заводы-изготовители:

1. Кентауский трансформаторный завод, г. Кентау;
2. ООО «Инвар-Элтранс», г. Москва;
3. ОАО «Энергозапчасть» г. Чебоксары;
4. ЗАО «Трансформер», г. Подольск;
5. ОАО «Укрэлектрораппарат», г. Хмельницкий;
6. ЭТК «БирЗСТ», г. Биробиджан;
7. ООО «Завод НВА», г. Рассказово;
8. ООО «Уральский завод трансформаторных технологий, г. Полевой;
9. ООО «Электрофизика», г. Санкт-Петербург (трансформаторы с алюминиевой обмоткой);
10. ООО «Электрофизика», г. Санкт-Петербург (трансформаторы с медной обмоткой).

Для серийных сухих трансформаторов до 1600 кВ·А, выпускаемых указанными выше заводами изготовителями, рекомендации по выбору с учетом потерь активной мощности обусловленных ВГ приведены в табл. 2 и на рис. 2.



**Рис. 1.** Изменение предельных относительных дополнительных потерь активной мощности в стали масляного силового трансформатора, вызванных ВГ, в зависимости от предприятия-изготовителя и номинальной мощности трансформатора



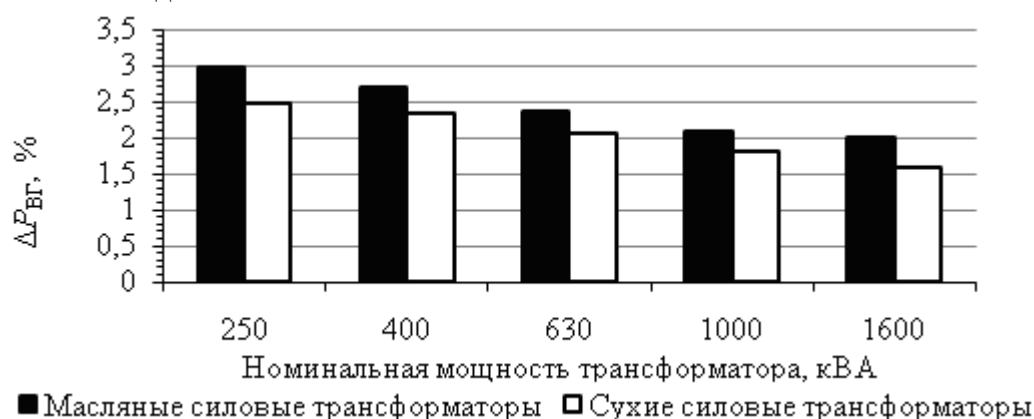
**Рис. 2.** Изменение предельных относительных дополнительных потерь активной мощности в стали сухого силового трансформатора, вызванных ВГ, в зависимости от предприятия-изготовителя и номинальной мощности трансформатора

**Таблица 2.** Рекомендации по выбору силовых трансформаторов распределительных сетей с учетом потерь активной мощности обусловленных ВГ

$S_n$ , кВА	Параметр	$\Delta P_{ВГ}$ , %	Произво- дитель*	Параметр	$\Delta P_{ВГ}$ , %	Произво- дитель**
	Масляные силовые трансформаторы			Сухие силовые трансформаторы		
250	Мин.	2,732	7	Мин.	2,173	7
	Сред.	2,985	-	Сред.	2,485	-
	Макс.	3,199	4	Макс.	3,351	9
400	Мин.	2,616	7	Мин.	1,974	3
	Сред.	2,691	-	Сред.	2,333	-
	Макс.	2,808	4	Макс.	3,622	9
630	Мин.	2,296	8	Мин.	1,664	7
	Сред.	2,364	-	Сред.	2,052	-
	Макс.	2,57	4	Макс.	2,768	6
1000	Мин.	1,999	3	Мин.	1,505	5
	Сред.	2,075	-	Сред.	1,809	-
	Макс.	2,324	4	Макс.	2,3625	9
1600	Мин.	1,904	2	Мин.	1,285	4
	Сред.	1,998	-	Сред.	1,582	-
	Макс.	2,144	4	Макс.	2,215	6

*Примечание:* \* – цифра соответствует номеру в перечне заводов-изготовителей масляных трансформаторов; \*\* – цифра соответствует номеру в перечне заводов-изготовителей сухих трансформаторов

В целях сравнения предельных относительных дополнительных потерь активной мощности в стали силовых трансформаторов, обусловленных ВГ, на рис. 3 приведена зависимость предельных дополнительных потерь от номинальных мощностей и способа охлаждения.



**Рис. 3.** Изменение среднего значения предельных относительных дополнительных потерь активной мощности в стали силового трансформатора, вызванных ВГ, в зависимости от номинальной мощности трансформатора и способа охлаждения

**Выводы:**

1. Как следует из рис. 3, предельные относительные потери активной мощности от высших гармоник сухих силовых трансформаторов меньше, чем масляных в среднем на 0,37 % от номинальной активной мощности силового трансформатора.

2. Как следует из рис. 1, 2 и 3, чем больше номинальная мощность силового трансформатора, тем меньше величина предельных относительных потерь активной мощности от высших гармоник.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Горпинич А.В., Нестерович В.В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / Под. ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
2. Фокеев А.Е. Исследование силовых трансформаторов при несинусоидальных режимах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. Ижевск. – 2012.
3. Савинцев Ю.М. Динамика спроса на силовые трансформаторы I-III габарита мощности в перспективе до 2020 года // «Пресс-электро». – 2008. – № 7(34).
4. Костинский С.С. Минимизация сверхнормативных потерь при выборе серийных силовых масляных трансформаторов // Изв. вузов. Электромеханика. Спецвып.: [Диагностика энергооборудования]. – 2010. – С. 121-122.
5. Костинский С.С. Минимизация сверхнормативных потерь при выборе серийных силовых сухих трансформаторов // Изв. вузов. Электромеханика. Спецвып.: [Диагностика энергооборудования]. – 2010. – С. 123-125.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ВЫБРОСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Делков А.В., Ходенков А.А., Замятина Э.В.  
Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

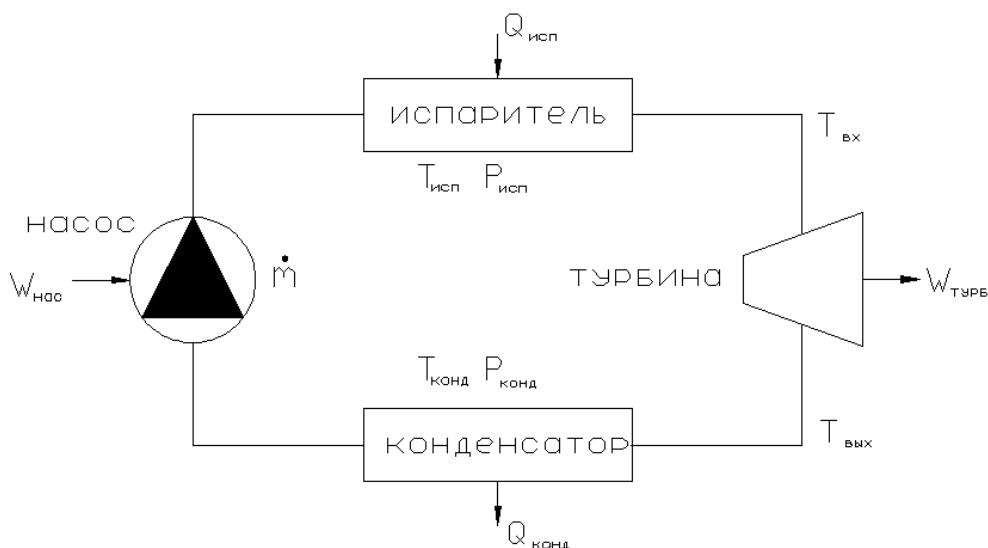
В настоящее время наблюдается устойчивый интерес к развитию альтернативных источников энергии. Одно из перспективных направлений альтернативной энергетики – утилизация низкотемпературного тепла с помощью паротурбинных установок (ПТУ) на низкипящих рабочих телах (НРТ). В качестве источников низкотемпературного тепла возможно использование: геотермального тепла; тепловой мощности солнечного излучения; тепловых выбросов промышленности.

Разработка установок утилизации низкопотенциального тепла на основе органического цикла Ренкина является сложной научно-технической задачей. Исследования в данном направлении осложняются необходимостью учета специфики рабочего тела, отсутствием экспериментальных данных по работе таких установок. Актуальность работ по созданию паротурбинных установок на органических рабочих телах обуславливает потребность в моделировании рабочих циклов установки для описания и оптимизации ее процессов.

В настоящей работе на основе математической модели исследуется работа ПТУ на НРТ с целью разработки эффективной конструкции установки и ее оптимизации.

Принципиальная структурная схема низкопотенциальной теплоэнергетической системы, реализующей цикл Ренкина на органическом рабочем теле (рис. 1), включает в себя следующие элементы [1]: турбина, циркуляционный насос, испаритель, конденсатор. Для выработки электрической энергии из механической, снимаемой с вала турбины, используется электрогенератор.





**Рис. 1.** Принципиальная схема установки

Принцип работы разрабатываемой установки, утилизирующей тепловые выбросы и вырабатывающей электроэнергию, следующий. Рабочее тело получает тепло от источника (например, слив отработавшей теплой воды, уходящие дымовые газы), при этом оно испаряется, т.е. переходит в пар высокого давления. После этого парообразное рабочее тело поступает на турбину, где оно совершает работу, раскручивая ротор турбины, подключенный к электрогенератору. Далее рабочее тело поступает в нижний теплообменный аппарат (конденсатор), где конденсируется за счет взаимодействия с источником холода (атмосферный воздух или холодная вода). Полностью сконденсировавшееся рабочее тело циркуляционным насосом подается в испаритель, и цикл повторяется заново [2].

Рассматриваемая установка является теплогидравлической системой – в ней одновременно протекают тепловые и гидравлические процессы. Для ее моделирования выделим основные определяющие параметры (рис. 1):

- температуры и давления испарения и конденсации в теплообменниках,
- температура на входе и на выходе турбины и насоса,
- массовый расход рабочего тела.

Энергетические параметры работы характеризуются следующими величинами:

- техническая мощность, снимаемая с турбины,
- количество теплоты, подведенное в испарителе и отведенное в конденсаторе,
- мощность, затрачиваемая на привод насоса.

Для рассматриваемой установки была построена система уравнений, представленная в таблице 1. Система уравнений строилась в предположении, что в теплообменниках отсутствуют гидравлические потери, а в гидравлическом тракте отсутствуют тепловые потери. В данной системе предусмотрены компонентные уравнения, описывающие процессы в одном элементе (теплообменник, турбина или насос), и топологические уравнения, связывающие все элементы. В качестве топологических уравнений (уравнений связи между элементами) используются уравнения, характеризующие баланс энергий и постоянство массового расхода.

**Таблица 1.** Система уравнений математической модели

	Испаритель	Конденсатор	Насос	Турбина
Компонентные уравнения	$Q = kF_{исп} \Delta T_{исп}$ $Q = \dot{m} \Delta h$	$Q = kF_{конд} \Delta T_{конд}$ $Q = \dot{m} \Delta h$	$\Delta p = \rho g \left( a + b \frac{\dot{m}}{\rho} \right)$	$l = \dot{m} \Delta h$
Топологические уравнения	$\sum Q = 0 \quad \dot{m} = const$			
Уравнение состояния	$f(p, \rho, T) = 0$			

*Примечание:*  $\dot{m}$  - массовый расход рабочего тела,  $\Delta h$  - перепад энтальпий в испарителе\конденсаторе,  $k$  - коэффициент теплопередачи,  $p$  - давление,  $\rho$  - плотность,  $a, b$  – коэффициенты в характеристике насоса.

В связи с необходимостью учета свойств рабочего тела установки, работающей по органическому циклу Ренкина (фреоны) при расчете процессов в каждом элементе служебным уравнением выступает уравнение состояния, позволяющее связать давление и температуру.

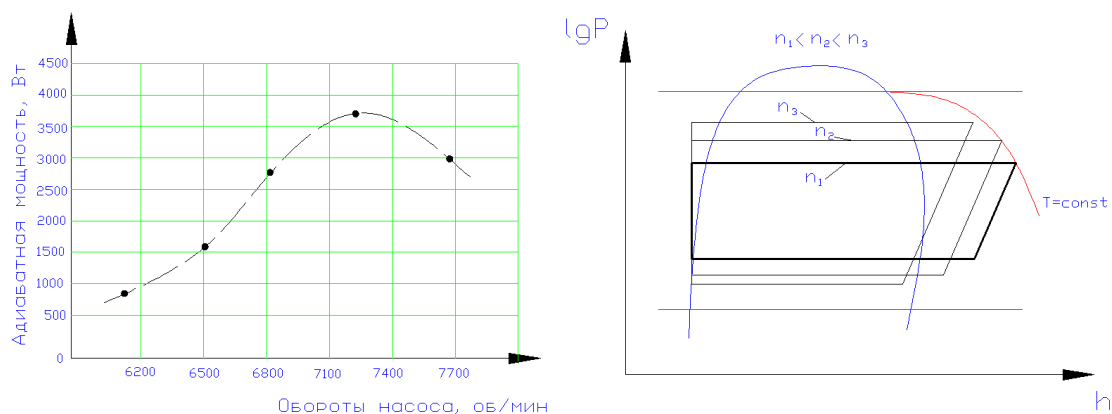
Т.к. параметры в элементах системы взаимозависимы расчет ведется итерационным методом. На первом этапе при рассмотрении гидравлической части системы (совмещение характеристик насоса и турбины) определяется расход и перепад давлений. Затем, при известных давлениях, рассчитываются параметры теплообмена в испарителе и конденсаторе. При известных температурах по уравнению состояния пересчитываются параметры рабочего тела (плотность, вязкость и т.д.) в различных точках системы. После этого расчет повторяется заново, пока не сойдутся балансы энергии и массы. В рамках данной работы вместо уравнения состояния использовалась база данных параметров состояния рабочего тела.

Для получения характеристик установки был создан расчетный алгоритм, позволяющий по известным температурам источника и стока тепла, характеристикам теплообменников, насоса и турбины определять энергетические параметры и оценивать эффективность работы. Алгоритм имеет возможность проводить оценку величины потерь на трение в рабочем колесе, в сопловом аппарате, с выходной скоростью.

При расчетах были приняты следующие условия: рабочее тело – фреон R22, температура источника тепла изменяется в диапазоне +50..+100 С, температура стока тепла – в диапазоне 0..+20 С, техническая мощность турбины 0..7000 Вт.

При исследовании влияния напора питательного насоса была получена характеристика по адиабатной мощности турбины (рис. 2). Адиабатная мощность растет до некоторых пределов, затем переходит максимальное значение и начинает убывать.

Полученная характеристика согласуется с теоретическими сведениями о работе установки следующим образом. При повышении напора насоса увеличивается перепад давлений в системе, а значит и перепад температур (рис. 2). Увеличивается удельная работа турбины, растет массовый расход.



**Рис. 2.** Зависимость мощности от угловой скорости вращения вала насоса и теоретический цикл установки при различных скоростях вращения вала насоса

Однако в то же время по рабочему циклу можно наблюдать негативные тенденции увеличения напора насоса:

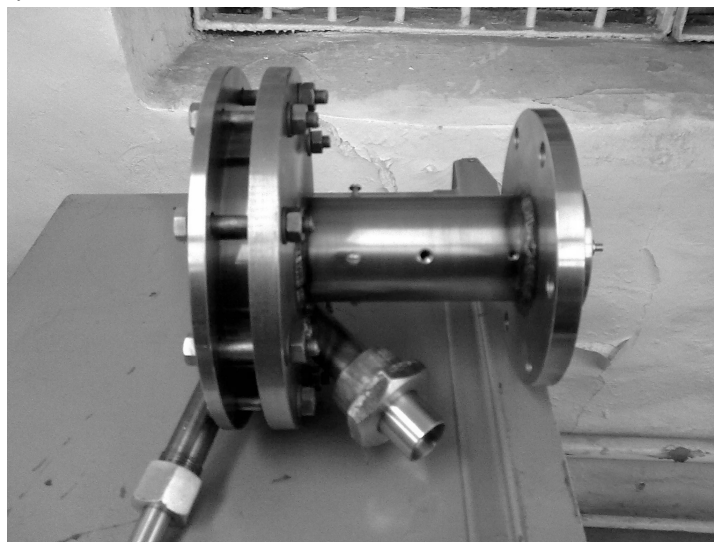
- уменьшается наклон изоэнтроп, а значит и скорость прироста удельной работы турбины;
- линия рабочего процесса в турбине приближается к зоне двухфазной смеси, при больших напорах пересекает линию насыщения;
- температурный напор на испарителе уменьшается, ресурса теплообменника начиная с некоторых пор, начинает не хватать, и наблюдается уменьшение перегрева пара перед турбиной.

Полученная характеристика (рис. 2) отражает наличие предела повышения эффективности установки при увеличении напора насоса. Для того, чтобы в этом случае повысить адиабатную мощность, необходимо предпринять следующие меры:

- повышение температуры источника,
- повышение интенсивности теплообмена испарителя.

Для верификации модели был спроектирован испытательный стенд установки. Основной элемент лабораторной установки – паровая турбина (рис. 3).

Проведение экспериментальных исследований на опытной установке, обработка и анализ результатов эксперимента и верификация модели на эксперименте еще предстоит авторам.



**Рис. 3.** Паровая турбина экспериментальной установки

Кроме того, планируется доработка математической модели паротурбинной установки. Корректировке подвергнутся расчетные коэффициенты потерь, которые определяются при анализе экспериментальных данных. В результате на основе полученной модели предполагается проводить оптимизацию паротурбиной установки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Joost J. Brasz, Bruce P. Biederman, Gwen Holdmann. 2005. Power Production from a Moderate-Temperature Geothermal Resource. In: GRC annual meeting; 2005; Reno, Nevada. URL: <http://chsr.squarespace.com/storage/documents/Power%20Production%20from%20a%20Moderate%20Temperature%20Geothermal%20Resource.pdf>
2. Sotirios Karellas, Andreas Schuster Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications Int. J. of Thermodynamics Vol. 11 (No. 3), pp. 101-108, September 2008.

## ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В СИСТЕМАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Колесов П.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Вакуумные солнечные коллекторы поглощают солнечную энергию, превращая ее в тепловую энергию. За счет солнечной энергии эта система способна обеспечить от 70 до 100% ежедневной потребности в горячем водоснабжении (ГВС) для бытовых целей и существенно снизить расходы (30...100%) на отопление помещений [1]. При недостаточной температуре горячей воды, в качестве дополнительного источника в систему ГВС устанавливается газовый котел (рис. 1). Необходимость его работы в системе должна быть минимизирована. Следовательно, съем тепла на солнечном коллекторе должен быть максимальным. Включение циркуляционного насоса коллектора происходило тогда, когда температура в коллекторе была больше чем в баке. При достижении нужной температуры в баке (температуры установленной) насос отключается. Затем процесс повторяется т.к. температура коллектора и бака постоянно приобретает разницу. Это приводило к частым включениям и отключениям контактора, двигателя. Это приводит к быстрому износу оборудования. Необходимо снизить количество включений, при этом обеспечить максимальный теплосъем на коллекторе. Для решения данной проблемы был использован автоматический регулятор ВЭСТ-02 [3].

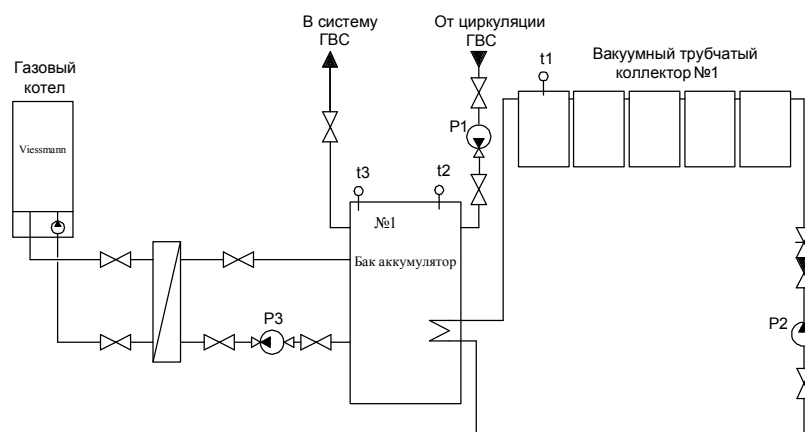


Рис. 1. Принципиальная схема системы ГВС с применением солнечного коллектора

Регулятор ВЭСТ имеет собственную среду программирования *Akiar*. В этой среде реализация работы системы ГВС происходит с помощью *FBD* блоков. Для решения проблемы был предложен сценарий (рис. 2), в котором применяется три параметра уставки и два измеряемых параметра.

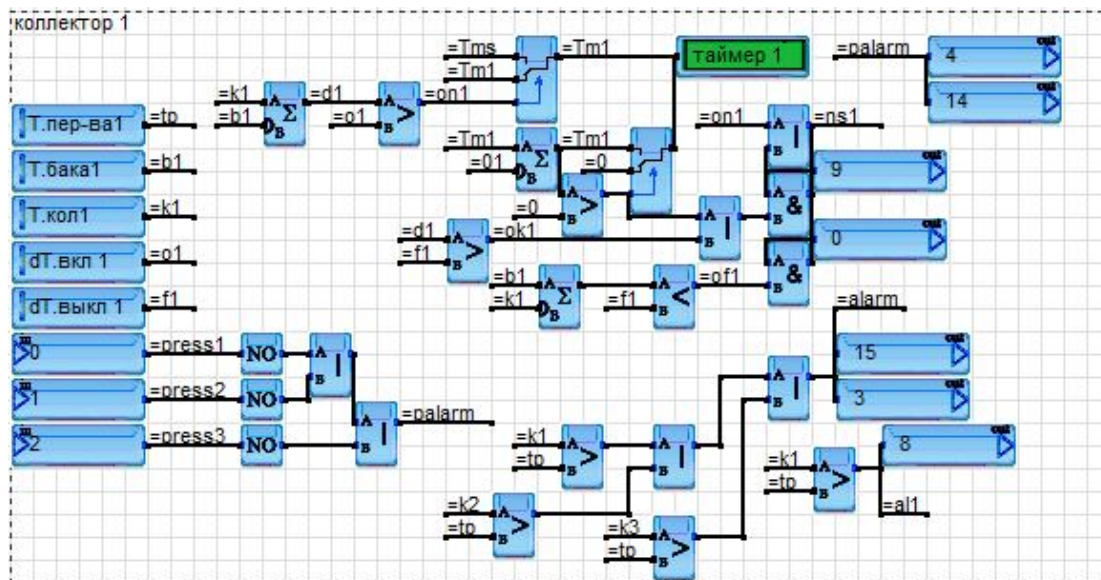


Рис. 2. Сценарий управления системы ГВС

Включение циркуляционного насоса коллектора осуществляется по установке (заданному значению) температуры включения  $dT_{\text{вкл}}$ . Значение  $dT_{\text{вкл}}$  является величиной, которая вычисляется контроллером, путем разницы температур коллектора и бака на примере формулы (1):

$$T_{\text{кол}} - T_{\text{бака}} > dT_{\text{вкл}}, \quad (1)$$

Выключение циркуляционного насоса происходит по установке (заданному значению) температуры  $dT_{\text{выкл}}$ . Значение  $dT_{\text{выкл}}$  является величиной, которая вычисляется контроллером, путем разницы температур коллектора и бака на примере формулы (2):

$$T_{\text{кол}} - T_{\text{бака}} < dT_{\text{выкл}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{кол}}$  – температура коллектора;  
 $T_{\text{бака}}$  – температура бака;  
 $T_{\text{вкл}}$  – температура включения насосов.

При таком условии циркуляционный насос начинает работу. Аналогично происходит выключение.

При достижении разницы температуры по параметру  $dT_{\text{выкл}}$  включается счетчик на 30 мин. по истечению, которого произойдет отключение насоса. Но если температура на коллекторе станет выше, счетчик обнулится, и насос работает до параметра  $dT_{\text{выкл}}$ .

$T_{\text{перегр}}$  – (температура перегрева) это температура, при достижении которой, циркуляционные насосы будут работать непрерывно. Последует сигнал на общую индикаторную лампу щита и регулятора.

При обрыве любого из датчиков температуры, т.е. коллектора, регулятор будет показывать температуру  $300^{\circ}\text{C}$ , циркуляционный насос будет работать постоянно. В таком случае нужно отключить насос с помощью автоматического выключателя и заменить датчик температуры на месте обрыва.

Для данного сценария управления формируется схема подключения для автоматического регулятора (рис. 3)

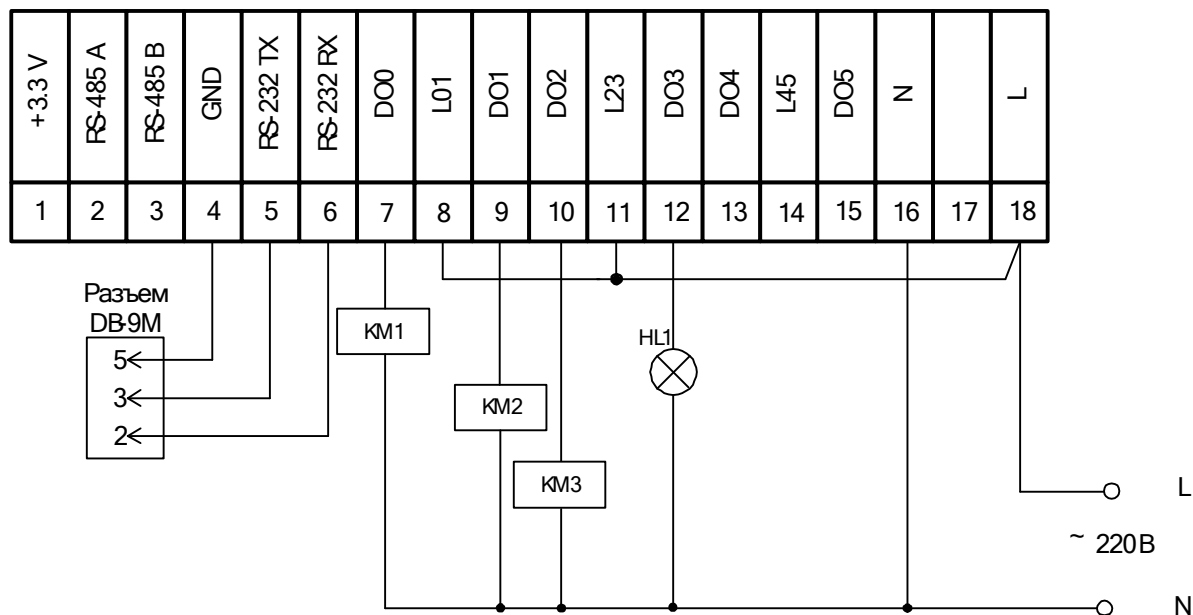


Рис. 3. Схема подключения нижней клеммной колодки

Обозначения:

KM1 – пускатель для циркуляционного насоса коллектора №1;

KM2 – пускатель для циркуляционного насоса коллектора №2;

KM3 – пускатель для циркуляционного насоса коллектора №3;

HL1 – лампа световой сигнализации «Перегрев».

Применение нового управления системы ГВС с применением солнечного коллектора позволило существенно сократить количество включений насоса, а так же обеспечить максимальное количество снятия тепла с солнечного коллектора, тем самым улучшить работы системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бутузov В.А., Солнечное теплоснабжение в России: состояние дел и региональные особенности// Энергосбережение, 2009, №3. С.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. 208 с.
3. Компания НПО ВЭСТ/[Электронный ресурс] / Продукция/ Регулятор ВЭСТ-02. – Режим доступа: <http://www.npowest.ru>, свободный.

### РАЗРАБОТКА И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА НА БАЗЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА

Коломейцев А.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

По мнению международных экспертов, относительные потери электроэнергии в электрических сетях большинства стран можно считать удовлетворительными, если она не превышает 4-5 %. Потери электроэнергии на уровне 10 % можно считать максимально допустимыми с точки зрения физики передачи электроэнергии по сетям. В настоящее время расход электроэнергии на ее передачу (потери) в электрических

сетях большинства стран составляет около 13 % от отпущенной электроэнергии в сети. Большую проблему в снабжении электроэнергией представляет доставка ее в удаленные районы [1].

Один из путей уменьшения расходов на передачу электроэнергии на большие расстояния - это беспроводная передача энергии. Устройство способное осуществить такую передачу — трансформатор Тесла. Простейший трансформатор Тесла состоит из двух катушек — первичной и вторичной, а так же разрядника, конденсатора и терминала. первичная катушка обычно содержит несколько витков провода большого диаметра, а вторичная несколько тысяч витков тонкого провода меньшего диаметра. В отличие от обычных трансформаторов здесь нет ферромагнитного сердечника. Таким образом, взаимоиндукция между двумя катушками гораздо меньше. Первичная катушка вместе с конденсатором образует колебательный контур, в который включен нелинейный элемент — разрядник, состоящий из двух массивных электродов регулируемым зазором. Вторичная катушка образует другой колебательный контур, где роль конденсатора главным образом выполняет собственная межвитковая емкость самой катушки. Таким образом, трансформатор Тесла представляет собой два связанных колебательных контура. Для полноценной работы эти два контура должны быть настроены на одну резонансную частоту [2].

Питание такого устройства можно осуществлять от сети переменного тока с напряжением 220 В. На рис. 1 представлена структурная схема разработанного трансформатора Тесла. На входе установлен понижающий трансформатор мощностью 50 Вт. Выходное пониженное напряжение подается на диодный мост и сглаживается батареей конденсаторов. Выпрямленное напряжение подается на параметрический стабилизатор, который используется для питания широтно-импульсного модулятора (ШИМ). ШИМ вырабатывает импульсы с регулируемой частотой, частота которых регулируется переменным сопротивлением в пределах 10...30 кГц. Импульсы с выхода микросхемы ШИМ подаются на усилитель мощности, нагрузкой которого служит катушка зажигания автомобиля.

Работа устройства была проверена от источника напряжения постоянного тока. Часть схемы, идущая до выпрямителя включительно, была заменена на систему аккумуляторных батарей общим напряжением 27В. Вследствие этого, мы получили портативное устройство, способное работать от постоянного тока, тем самым расширив диапазон использования трансформатора Тесла.

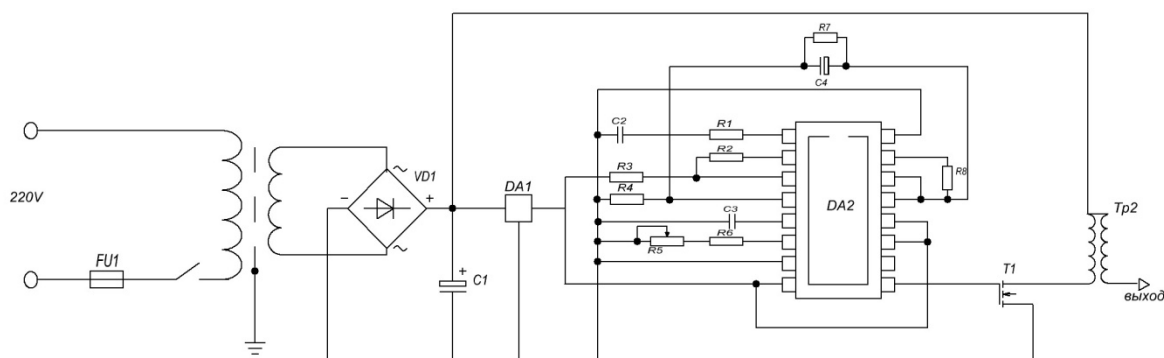


Рис. 1. Структурная схема трансформатора Тесла

В работе было изучено влияние разработанного устройства на различные электронные приборы, такие как персональный компьютер, ноутбук, мобильный телефон, а так же автомобиль. Негативных воздействий на работу электроприборов выявлено не было, что позволяет использовать трансформатор Тесла как устройство беспроводной зарядки. Однако было замечено, что при коротком замыкании трансформатора, то есть при непосредственном пробое между терминалом и заземлением возникает резкий скачек мощности электромагнитного поля, что в свою очередь вынуждает большинство электронных приборов перезагрузиться.

В течение двух месяцев проверялось возможное отрицательное влияние разработанного трансформатора Тесла на развитие организмов. Опыты проводились со свежесажеными комнатными растениями.

Растения были разделены на 3 группы. Первая группа — контрольная, произрастала в соседней аудитории с уровнем освещенности соответствующей освещенности в солнечные дни. Вторая группа находилась в аудитории, где проводились опыты, но непосредственно с терминалом трансформатора Тесла не контактировала. Третья же группа принимала активное участие в экспериментах по передаче электроэнергии без проводов, где регулярно в горшки с растениями (независимо, влажная или сухая земля) устанавливался выходной терминал трансформатора, а на другом конце подключалась люминесцентная лампа. При контакте с землей она начинала светиться, яркость свечения которой зависела от близости к растению. В ходе наблюдения за растениями, в течение вышеупомянутого срока, видимых отклонений не наблюдалось ни в одной из групп.

В качестве вывода по проделанной работе можно сказать следующее:

- - устройство способно беспрепятственно предавать электроэнергию, причем в качестве проводника можно использовать любую среду доступную для передачи тока: металл, вода или земля;
- - трансформатор Тесла можно использовать для передачи энергии от источников постоянного тока, например, аккумуляторной батареи; - в удаленных районах, а именно в условиях отсутствия централизованного электроснабжения применение устройства повысит энергоэффективность передачи электрической энергии;
- - благодаря способности передачи энергии с помощью одного контакта сократится себестоимость сети электроснабжения за счет потерь в проводниках и меньшего количества провода передачи (один провод вместо двух);
- - с помощью трансформатора Тесла возможно разрабатывать технологии беспроводной зарядки аккумуляторов ноутбуков, мобильных телефонов, а так же современных автомобилей работающих от аккумуляторных батарей.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Белей В.Ф. // Журнал «Балтийский регион» №1, 2010
2. Tesla N., Lectures Patents, Articles, Beograd, 1956, pg.53.

#### **РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ**

Петрусёв А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Целью работы является создание солнечной установки, экономически и энергетически превосходящей общепринятые стандартные системы.



Тема проекта актуальна в рамках реализации программ по Критическим технологиям федерального уровня приоритетных направлений России. Солнечные установки имеют невысокую эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую в течение дня, которая зависит не только от собственного КПД солнечных элементов (который для стандартных панелей лежит в пределах 14-18%), но и от положения солнца относительно солнечных панелей. Наиболее же важным фактором, ограничивающим распространение солнечных станций, является их высокая стоимость – порядка 2-3\$ за удельный Ватт мощности.

Мы предлагаем оснащать фотоэлектрические установки солнечными трекерами и акриловыми концентраторами, которые имеют ряд преимуществ перед своими аналогами.

Перед началом их разработки были проведены теоретические и экспериментальные исследования. Рассчитана зависимость достигающей фотоэлементов солнечной радиации от угла падения на солнечную панель лучей.

При расчёте учитывались такие характеристики, как общая площадь падения, коэффициент отражения материалов, фоновое излучение. На основе вышеуказанных зависимостей получено, что солнечная панель вырабатывает приблизительно на 40% меньше энергии из-за движения солнца по высоте и азимуту в течение дня.

Основным и наиболее эффективным способом увеличения мощности солнечных установок при как можно меньшем увеличении цены всей системы является установка концентратора. Концентратор – это устройство, собирающее солнечную энергию с большей площади и направляющее её на меньшую, тем самым позволяя генерировать ту же мощность при меньшем количестве используемых фотоэлементов, которые составляют основную долю стоимости солнечных систем. Предлагается использование уникального акрилового концентратора. (Рис.1)

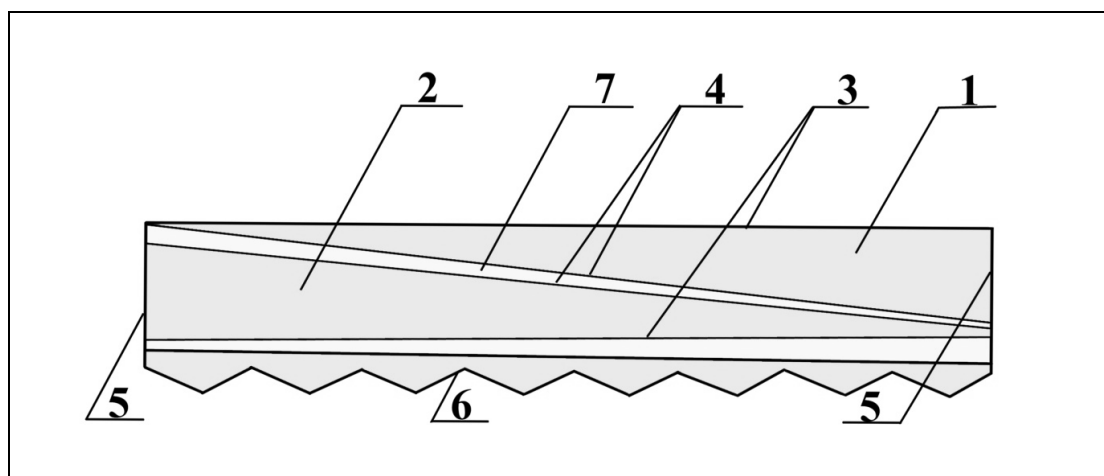


Рис. 1. Схема акрилового концентратора в разрезе

Он представляет собой лист оргстекла толщиной всего около 1 сантиметра со специальной внутренней и внешней структурой. Принцип действия концентратора основан на явлении полного внутреннего отражения. Солнечные лучи, падая на рабочую грань 3 оптического клина 1, частично отражаются, а частично, испытывая преломление на границе раздела, проникают внутрь клина. В зависимости от коэффициента преломления материала клиньев, оптической среды 7 и угла клина лучи, попавшие в клин 1, либо отражаются от его грани 4, либо проходят сквозь нее и оптическую среду 7, имеющую показатель преломления, меньший, чем показатели

преломления оптических клиньев 1 и 2, внутрь клина 2. При этом вследствие эффекта полного внутреннего отражения лучи, отразившиеся от грани 4 клина 1, попадают в конечном счете на основание 5 оптического клина 1. Лучи, прошедшие в оптический клин 2, проходят через его рабочую грань 3 и попадают на светоотклоняющий элемент 6, отражаясь им обратно в оптические клинья 1 и 2. Элемент 6 выполнен таким образом, что отраженные от него лучи входят в клинья 1 и 2 под углами, обеспечивающими их полное внутреннее отражение внутри клиньев, с дальнейшим попаданием их на основания 5 клиньев.

В связи с отношением площади приёмной поверхности концентратора к одному торцу как 1 к 14, достигается 7ми кратная концентрация и КПД порядка 75%, связанный с потерями энергии при поглощении излучения материалом концентратора и частичном отражении излучения на каждой границе материалов. Геометрическая эффективность лучей, доходящих до фотоэлементов на торцах, рассчитывалась методом Монте-Карло в программе ZEMAX. КПД посчитан теоретически и подтверждён экспериментально. Концентратор имеет маленький вес и объём, имеет большую диаграмму направленности на солнце и не требует мощных систем охлаждения, позволяя обойтись пассивными радиаторами.

Но даже при эффективной работе концентратора в пределах от -30 до +30 градусов отклонения солнца по высоте, необходима его периодическая ориентация по азимуту. К тому же и обычные солнечные панели в течение дня вырабатывают примерно на 40% меньше энергии, как было указано ранее, в сравнении с тем, если бы солнечные лучи постоянно падали на них отвесно. Поэтому необходимо наличие солнечного трекера – устройства, периодически поворачивающего концентратор или солнечную панель на солнце.

Мы предлагаем одноосевой активный солнечный трекер. Принцип его действия основан на аналогово-цифровом сигнале платы управления, которая позволяет отказаться от использования микроконтроллеров и шаговых двигателей, позволяя снизить цену системы и упростить её, сохраняя качество и надёжность.

Разработана опытная модель установки в уменьшенном масштабе.

На трекер также установлены концевые выключатели на основе оптопары, ограничивающие угол поворота установки, что предотвращает наматывание и излом проводов.

Использование трекера позволяет увеличить эффективность работы на 30-35% для солнечных батарей и в несколько раз для концентратора. Применение же концентратора и трекера одновременно позволяет снизить стоимость солнечной энергии более чем в 2 раза.

На данный момент при грантовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере ведётся работа по созданию установки мощностью 200Вт. Приобретены 2 солнечных модуля мощностью 100Вт из Зеленограда. Их эффективность проверена на тестовом лабораторном стенде Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов, который способен генерировать стандартную мощность 1000Вт/м<sup>2</sup>. Собран каркас для закрепления солнечных панелей, на котором имеется возможность менять угол наклона панелей от 40 до 60 градусов, что позволит увеличить эффективность сбора энергии в разные времена года. Ведётся работа по сбору механизма вращения трекера.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ РАСХОДА ЖИДКОСТИ (РАСХОДОМЕРОВ)

Конев Н.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

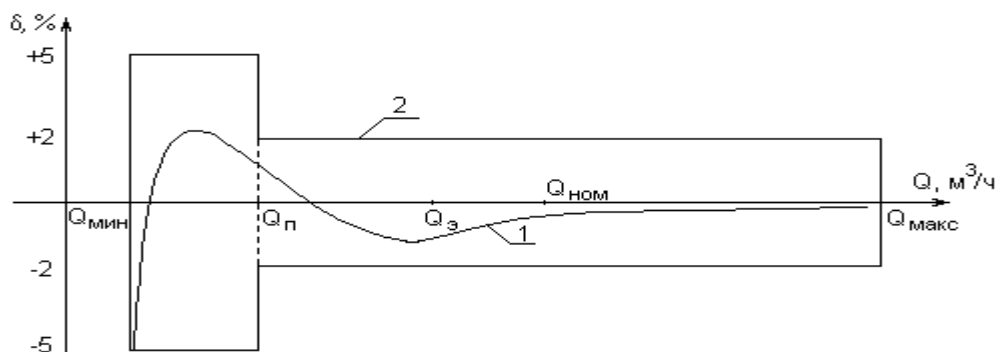
Цель исследования: - изучить конструкцию расходомеров, счетчиков количества жидкости и исследовать их работу; - научиться определять расход воды тремя методами: непосредственно по показаниям самого счетчика количества воды, с помощью подсчета импульсов, подаваемых с счетчика воды на счетчик импульсов, и путем определения перепада давления; - научиться определять пригодность счетчиков воды с помощью определения погрешности их показаний.

**Объемные расходомеры.** Для учета количества жидкости, расходуемой отдельными небольшими потребителями (жилые и общественные здания, небольшие предприятия, отдельные цеха), наибольшее распространение получили механические скоростные счетчики воды [1].

По конструктивному исполнению скоростные (тахометрические) счетчики жидкости подразделяют на две основные группы: крыльчатые, ось вращения крыльчатки которых перпендикулярна направлению движения жидкости, и турбинные, у которых ось вращения турбинки параллельна направлению движения жидкости.

Принцип действия скоростных счетчиков жидкости основан на измерении числа оборотов крыльчатки или турбинки, приводимых в движение потоком протекающей через счетчик жидкости. Число оборотов крыльчатки или турбинки пропорционально количеству протекающей через счетчик жидкости. Ось крыльчатки или турбинки с помощью передаточного механизма соединена со счетным механизмом, который, учитывая число оборотов, показывает количество протекающей через счетчик жидкости.

Метрологическими параметрами счетчиков воды являются пределы допускаемой погрешности в различных диапазонах измеряемых расходов и класс счетчика. Метрологические качества счетчиков можно оценить, используя график погрешности этих приборов (рис. 1).



**Рис. 1.** График изменения погрешности скоростных счетчиков: 1 – фактическая погрешность; 2 – допускаемые погрешности

**Крыльчатые счетчики воды.** Крыльчатые счетчики воды выполняются одноструйными и многоструйными. В крыльчатом одноструйном счетчике вода подводится к крыльчатке одной струей, направленной по касательной к окружности, проходящей через центры лопаток крыльчатки. В многоструйных счетчиках вода с помощью направляющего аппарата подводится к крыльчатке несколькими струйками, равномерно распределенными по ее окружности.

**Турбинные счетчики воды.** Основной частью турбинных счетчиков воды является измерительная камера, обеспечивающая преобразование скорости потока во вращательное движение турбинки. Измерительная камера располагается горизонтально или вертикально в корпусе счетчика, где также встроены блок счетного механизма и регулятор. Турбинные счетчики используют для измерения расходов холодной воды температурой до 40 °С.

**Расходомеры переменного перепада давления.** Принцип измерения расхода расходомером переменного перепада давления основан на том, что в зависимости от расхода вещества изменяется перепад давления на неподвижном сужающем устройстве, установленном в трубопроводе или элементе трубопровода (колена). Расходомеры переменного перепада давления состоят из трех элементов: сужающего устройства, дифференциального манометра для измерения перепада давления и соединительных линий с запорной и предохранительной арматурой. Применяются следующие стандартные сужающие устройства: диафрагмы, сопла, сопла Вентури и трубы Вентури [2].

**Расходомеры постоянного перепада давления.** Расходомеры постоянного перепада давления относятся к группе расходомеров обтекания, то есть, к расходомерам, основанным на зависимости перемещения тела, воспринимающего динамическое давление обтекающего его потока, от расхода измеряемой среды. Наиболее распространенными расходомерами постоянного перепада давления являются ротаметры. Основной измерительной частью ротаметров является ротаметрическая пара.

**Устройство тахометрического счетчика** Принцип работы счетчика достаточно прост: проходящий поток воды крутит крыльчатку, и через систему шестеренок количество оборотов крыльчатки определяет показания счетчика. Механизм тахометрического счетчика не имеет контакта с потоком воды, и такой счетчик называется сухим. Индикаторное устройство состоит из пяти роликов, которые через масштабирующий механический редуктор отображают измеренный объем воды в кубометрах. Ролик красного цвета и стрелочный указатель отображают доли кубических метров. Взаимодействие между крыльчаткой и счетным механизмом осуществляется путем магнитной связи через герметичную перегородку. Опорные части крыльчатки и счетного механизма оснащены твердыми осями – часовыми камнями из рубина, что обеспечивает увеличение срока эксплуатации и высокую надежность измерительного прибора [3].

**Краткое описание методики работы со счетчиками расхода воды:**

*Счетчик расхода воды с барабанным цифровым механизмом.* На панели таких счетчиков значение накопленного расхода отображается в прорези. Это значение необходимо записать. Чтобы знать, сколько воды было израсходовано за отчетный период, необходимо вычесть из текущего значения записанное ранее число. *Счетчик воды с циферблатом.* На панели такого счетчика по кругу расположены маленькие циферблаты. Большая стрелка, указывающая цифры по внешнему краю прибора, дает десятые доли кубического метра (каждая десятая доля соответствует 100 литрам). На маленьком циферблате с надписью «единицы» отсчитываются целые значения в кубических метрах (каждый кубический метр соответствует 1000 литрам). Соответственно надписям на других циферблатах отсчитываются десятки, тысячи и десятки тысяч кубических метров.

**Определение зависимости расхода воды от температуры, давления и содержания воздуха в ней.** Зависимость расхода воды от давления, температуры и

количества воздуха отображается графически. По данным журнала наблюдений строится график.

На графике отображается зависимость расхода воды ( $Q$ ) от давления ( $P$ ). Для каждого режима нужно отметить три точки на плоскости, соответствующие трем измерениям при разных фиксированных значениях давления. Точкам присваиваются двухзначные номера вида  $x.y$ , где  $x$  – это номер режима работы,  $y$  – номер измерения. Затем соединяются точки с одинаковыми значениями  $x$  и отдельно – с одинаковыми значениями  $y$ . Для наглядности кривые, соединенные по параметру  $x$ , должны отличаться по цвету от прямых, соединенных по параметру  $y$ . Вертикальные прямые (соединенные по параметру  $y$ ) показывают зависимость расхода воды от плотности. Горизонтальные кривые (соединенные по параметру  $x$ ) показывают зависимость расхода воды от давления. Сравнение линий 2-го и 5-го, а также 3-го и 4-го режимов дает понимание о зависимости расхода воды от температуры. Пример оформления графика представлен на рис. 2.

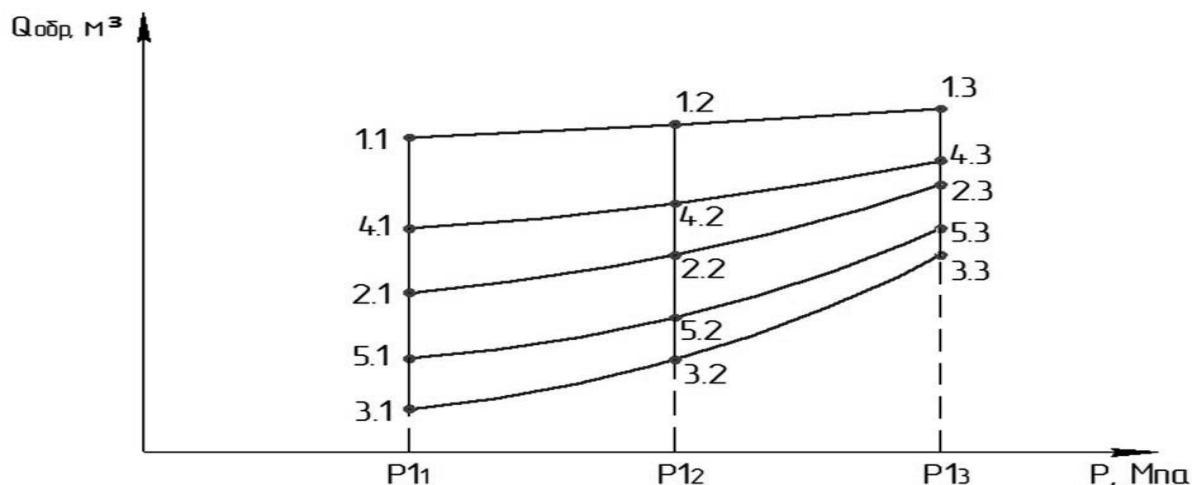


Рис. 2. Пример оформления графика зависимости расхода воды от давления

На основании измерений надо сделать вывод о влиянии температуры, давления и наличия воздуха на расход воды.

Выводы:

В ходе исследования были изучены различные способы измерения расхода жидкости, разработан стенд для изучения датчиков расхода жидкости. В данной работе исследуются датчики расхода жидкости (расходомеры) крыльчатого типа. Преимуществами датчиков крыльчатого типа по сравнению с другими являются: Экономичность, простота в эксплуатации и ремонте. Недостатками крыльчатых расходомеров является то, что они не предназначены для загрязненных жидкостей (обязательно нужно ставить фильтр) и не способны измерять расход жидкости при малой частоте вращения крыльчатки. По моему мнению, расходомеры должны быть обязательно включены в программу изучения для студентов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник / под ред. Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2002. Кн. 1: Расходомеры переменного перепада давления, расходомеры переменного уровня воды, тахометрические расходомеры и счетчики. – 416 с., ил.

2. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник / под ред. Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. Кн. 2: Расходомеры: обтекания, силовые, тепловые, оптические, ионизационные, ядерно-магнитные, концентрационные, меточные, корреляционные, вихревые, электромагнитные, ультразвуковые (акустические). – 416 с., ил.
3. Санников, С. П. Исследование расходомеров и счетчиков количества жидкости : методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Технические средства автоматизации и управления» для студентов направлений 220200, 220400, 220301, 220700 всех форм обучения / С. П. Санников, М. С. Бондюгова ; Минобрнауки России, Урал. гос. лесотехн. ун-т, Каф. автоматизации производственных процессов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. – 24 с. : ил. - Библиогр.: с. 24.

### КРУГЛЫЙ СТОЛ 3. СТРАТЕГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

---

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ВЬЕТНАМА И СПОСОБНОСТЬ УДОВЛЕТВОРЯТЬ ПОТРЕБНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Нгуен Ван Ву

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Энергетические ресурсы являются основным ресурсом, чтобы удовлетворять потребности экономического и социального развития страны. Природные ресурсы играют важную роль для экономической системы, но и создают много проблем в сфере политической и национальной безопасности. Вьетнам находится в тропическом регионе с влажным климатом Юго-Восточной Азии, энергетические ресурсы многообразные, такие как уголь, нефть и газ, приливы и отливы и возобновляемые источники энергии, такие как солнечная энергия, энергия биомассы, геотермальная энергия, энергия океана ... Однако, экономическое развитие, на практике на протяжении многих лет показывает, что в стране большая волатильность топливной энергетики; помимо экспорта угля и сырой нефти, мы занимаемся импортом нефтепродуктов и электроэнергии. Вопрос в том, как производить? Чтобы энергетические ресурсы Вьетнама не только удовлетворяли потребности экономического развития и социального роста в ближайшие годы - мы можем экспортировать ресурсы в виде энергии и адаптироваться к рыночным колебаниям.

*1. Виды энергетических ресурсов и способы добычи полезных ископаемых во Вьетнаме*

##### **Уголь**

Уголь во Вьетнаме является основным видом энергетического сырья. На территории страны известно около ста угольных месторождений и углепроявлений разной степени изученности. Основные действующие угледобывающие предприятия расположены в северной части страны. Разведанные и предварительно оцененные запасы углей категорий А+В+С1+С2 Вьетнама составляют 20,9 млрд т, в том числе каменных – 20 млрд т и бурых – 900 млн т. По некоторым оценкам, прогнозные ресурсы угля страны достигают 57-70 млрд т (в т.ч. каменные – 20 млрд т, бурые – 37-50 млрд т).

Добыча угля во Вьетнаме стремительно растёт: в период с 2007 по 2014 г. она увеличилась в полтора раза, составив в 2014 г. почти 58 млн т. Основная добыча сосредоточена в бассейне Куангьен, на месторождениях и участках Куанглой (Quang Loi), Монгдионг (Mong Duong), Кокшау (Coc Sau), Деонай (Deo Nai), Лочи (Lo Tri), Кхесим (Khe Sim), Бангдань (Bang Danh), Чангбать (Trang Bach), Маокхе (Mao Khe), Халам (Ha Lam), Тхантхунг (Than Thung), Вангдань (Vang Danh), Кхетям (Khe Cham), Кхетам (Khe Tam), Нгахай (Nga Hai), Харанг (Ha Rang), Суойланг (Suoi Lang), Наготна (Nagotna), Донгданг-Дайдан (Dong Dang-Dai Dan), Куангла (Quangla), Хамок (Ha Moc), Кокень (Co Kenh), Донгвонг (Dong Vong), Донгри (Dong Ri), Уонгтхуонг (Uong Thuong), Кхетюой (Khe Chuoi), Хотхьен (Ho Thien).

Почти всю угледобычу в стране через 20 угледобывающих компаний контролирует государственная компания VINACOAL, которая в 2005 г. стала дочерней компанией Vietnam National Coal Group.

Основными потребителями угля являются ТЭЦ и металлургическая промышленность.

Вьетнам в 2007 г. экспортировал около 20 млн т угля (антрацита), в основном в Японию и Китай.

Освоению угольных ресурсов в стране препятствует неразвитость инфраструктуры, недостаточность капиталовложений, слабая техническая оснащённость отрасли. В настоящее время правительство уделяет большое внимание привлечению иностранного капитала для развития угледобывающей промышленности.

### **Нефть**

Доказанные запасы нефти во Вьетнаме, по оценке на 1.01.2007 г., составляли около 82 млн т.

Все известные нефтяные месторождения Вьетнама расположены в акватории Южно-Китайского моря. По вьетнамской классификации в пределах континентального шельфа выделяется шесть нефтегазоносных бассейнов (НГБ), по российской – четыре, потому что два из шести НГБ относятся к недостаточно исследованным: Бакбо (Сонгхонг) у северного побережья страны и Фанг (Хоангса) – в открытом море, на расстоянии более 100 км от побережья центрального Вьетнама. Заметно более перспективным считается НГБ Бакбо.

Основные семь месторождений нефти расположены в Сиамском НГБ (Намконшон) и Меконгском НГБ (Куулонг). Все они открыты более 20 лет назад и характеризуются лёгкой нефтью и преимущественно малыми глубинами залегания продуктивных горизонтов: 35-100 м от уровня морского дна. Разрабатывает эти месторождения российско-вьетнамское СП «Вьетсовпетро». С вьетнамской стороны в СП участвует государственная нефтегазовая компания Vietnam Oil and Gas Corp. (Petrovietnam). Акции российской стороны переданы ОАО «Зарубежнефть».

### **Природный газ**

Территория Вьетнама и принадлежащая ему акватория располагаются в пределах трёх нефтегазоносных бассейнов: Сиамского (юго-западная часть), Меконгского (юго-восточная часть) и Бакбо (северо-восточная часть) и потенциально нефтегазоносного бассейна Восточного Вьетнама. Доказанные запасы горючего природного газа Вьетнама составляют 190 млрд куб.м, или 0,1% мировых. Газ в основном попутный; месторождений, где он образует свободные залежи, мало. Первые запасы газа были открыты на суше в северной провинции Тэйнинь, в основном же он сосредоточен на морских месторождениях южной акватории (Сиамский и Меконгский НГБ), на глубинах моря, не превышающих 500 м.

### **Ресурсы Вьетнама для альтернативной энергетики**

Альтернативные источники энергии относятся к неисчерпаемым ресурсам, а неисчерпаемые ресурсы – это ресурсы, количество которых не изменяется во времени. Следовательно, использование таких источников крайне выгодно для экономики любой страны.

Биомасса во Вьетнаме рассматривается как многообещающий источник энергии. Использование отходов для выработки энергии во Вьетнаме в настоящее время носит частный характер, то есть производство биогаза из различных видов сельскохозяйственных отходов (навоз, солома, городские продуктовые отходы) идёт для домашнего потребления, а также используется на сельскохозяйственных предприятиях. Например, по предварительным подсчётам, ежемесячная экономия семьи на топливе, благодаря использованию биогаза, составляет 150000–200000 донгов (10 долл. США). Вьетнам – одна из ведущих стран по производству риса, следовательно, имеется большой избыток рисовой шелухи. Исследователи из Международной финансовой корпорации Всемирного банка обнаружили, что из 1,5 млн. тонн шелухи в год, можно получить 1,2 трлн. кВтч электроэнергии.

Распределение энергии ветра по районам Вьетнама неравномерно, причём максимальная концентрация ветровой энергии наблюдается в горных районах Вьетнама



(Шонла, Хатуен и Даклак). Здесь можно максимально использовать ветровую энергию для выработки электроэнергии комплексом ветровых энергетических установок большой мощности, не оказывая вредного влияния на окружающую среду.

По сравнению с другими возобновляемыми источниками энергии на территории Вьетнама, использование энергии солнечной радиации имеет ряд преимуществ. Одно из них, этот ресурс отличается доступностью по всей территории Вьетнама. Проекты больших солнечных электростанций, мощность которых можно было бы подать в общую энергосеть страны пока не разработаны. Малые опытные установки на основе солнечных батарей, располагаемые ныне на удалённых островах, уже работают с целью получения электроэнергии для освещения и бытовых приборов с малой мощностью (радио, телевизор, вентилятор и т. п.).

## *2. Предлагаемые решения для удовлетворения потребностей в энергии для экономического развития*

Для удовлетворения потребностей в энергии и для экономического развития общества в ближайшие годы, Вьетнам должен адаптироваться к рыночной экономике и уметь выживать в жесткой конкуренции.

**Во-первых**, полное и эффективное использование энергетических ресурсов, имеющихся во Вьетнаме, с высокой конкуренцией не только для внутреннего рынка, но даже с региональными и глобальными рынками мира, где у нас есть преимущества.

**Во-вторых**, мы вынуждены уменьшать источники топлива, выбрасывающие парниковые газы в атмосферу, такие как уголь, нефть и увеличить национальные запасы истощенными топливом, поэтому нам нужно создать политику, поощряющую инвестиции, обновляющие технологические процессы, повышающие энергоэффективность затрат на производство.

**В-третьих**, должны использовать возобновляемые виды энергии, особенно энергию ветра, солнца и энергию биомассы.

**В-четвертых**, повышать осведомленность людей, чтобы экономно использовать энергию.

Таким образом, Энергоресурсы Вьетнама разнообразные, имеют некоторые категории в сфере конкурентоспособности, в частности, возобновляемые источники энергии, такие как энергия солнца, ветра и биомассы. Для удовлетворения потребностей экономического развития в ближайшие годы, в рыночной экономики, где конкуренция является жесткой и эффективной реализации стратегий роста в сокращение выбросов парниковых газов, нам необходимо развивать внутренние ресурсы, чтобы иметь возможность удовлетворять внутренние потребности в энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вьетнам [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.mineral.ru/Facts/world/116/137/index.html](http://www.mineral.ru/Facts/world/116/137/index.html)
2. РЕСУРСЫ ВЬЕТНАМА ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.confcontact.com/2013-alyans-nauk/tn1\\_rodionova.htm](http://www.confcontact.com/2013-alyans-nauk/tn1_rodionova.htm)
3. Nguồn tài nguyên năng lượng Việt Nam và khả năng đáp ứng nhu cầu phát triển kinh tế [Электронный ресурс]. Режим доступа: [nangluongvietnam.vn/news/vn/hoi-thao-truc-tuyen/nguon-tai-nguyen-nang-luong-viet-nam-va-kha-nang-dap-ung-nhu-cau-phat-trien-kinh-te.html](http://nangluongvietnam.vn/news/vn/hoi-thao-truc-tuyen/nguon-tai-nguyen-nang-luong-viet-nam-va-kha-nang-dap-ung-nhu-cau-phat-trien-kinh-te.html)

## **ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СЕТЯХ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМИ**

Хафизов Р.Р., Гусаков Д.В., Зарипов Р.Ф.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

В современном мире на всех уровнях управления энергетикой большое внимание уделяется проблеме энергосбережения. В связи с этим актуальным становится решение проблемы феррорезонансных явлений в сетях, содержащих измерительный трансформатор напряжения (ТН).

Феррорезонансным называют резонансные явления в цепях, содержащих катушку со стальным сердечником и конденсатор, связанный с нелинейным характером индуктивности. Ферромагнитными элементами в электрических сетях являются силовые трансформаторы, дугогасящие реакторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, электродвигатели, то есть все аппараты, в которых имеется катушка с ферромагнитным (стальным) сердечником. Особенностью катушки с ферромагнитным сердечником является нелинейная зависимость тока от напряжения (потока). При воздействиях на ферромагнитный элемент, приводящих к насыщению сердечника, происходит плавное изменение индуктивности этого элемента, что создаёт возможность возникновения резонанса между индуктивностью и ёмкостью

Как известно, нейтраль ТН в сетях с изолированной нейтралью (сети 6-35 кВ) должна быть заземлена. При нарушении изоляции фазы сети происходит полное или частичное замыкание фазы на землю и на соответствующих выводах ТН появляется напряжение контрольного сигнала. Оно создается напряжениями нулевой последовательности  $U_0$ , возникающими в фазах ТН. Напряжения  $U_0$  вызывают ток нулевой последовательности, который замыкается по заземляющему проводу ТН через емкости линейных проводов относительно земли и далее по обмоткам ТН. В этом контуре при определенном соотношении параметров нелинейной индуктивности ТН и емкости линейных проводов возникает феррорезонанс, приводящий к многократному увеличению тока контура и фазных напряжений сети. Это способствует выходу из строя ТН, повреждению изоляции сети и возникновению аварий. Феррорезонансные явления наблюдаются также при обрывах и замыкании проводов, при несимметрии проводимостей на землю, при прерывистых дуговых замыканиях, при подключении генераторов к холостым шинам. [1].

Для того чтобы снизить ущерб от феррорезонанса, выпускают различные антирезонансные ТН. Антирезонансным ТН – это трансформатор, устойчиво работающий при наличии в сети феррорезонансных явлений.[2] Подобного рода трансформаторы оказываются дороже обычных, поэтому их применение должно быть экономически обусловлено, на основании снижения повреждаемости в той или иной сети.

Поскольку вид феррорезонанса напрямую связан с видом заземления нейтрали, разновидности антирезонансных ТН делят непосредственно по классам напряжения.

Феррорезонанс в сетях напряжений 6-35 кВ

Феррорезонансные процессы в таких сетях могут развиваться только в нулевом канале. При этом одновременно резонирует вся сеть. Междофазные напряжения остаются без изменения, а искажаются только фазные. Повреждаются от феррорезонанса только заземляемые ТН, которые ведут контроль изоляции относительно земли. Высокая повреждаемость таких ТН обуславливает переход к антирезонансным ТН, которые должны не только сохранить функциональность предшествующих ТН, но и выполнять новые задачи и требования.

К антирезонансным ТН, предназначенным для работы в этих сетях, предъявляются следующие требования, основанные на анализе встречающихся феррорезонансных явлений:

- не вызывать самим устойчивого феррорезонанса;
- не повреждаться при длительных однофазных замыканиях сети на землю через перемежающуюся дугу;
- не повреждаться при устойчивом феррорезонансе емкости сети с нелинейной индуктивностью других трансформаторов.[3]

#### Феррорезонанс в сетях напряжений 110 кВ

Сети данного напряжения работают с эффективно заземленной нейтралью, однако у значительной части силовых трансформаторов она разземлена для уменьшения токов КЗ и упрощения релейной защиты. В этих сетях были замечены три вида устойчивых феррорезонансных явлений:

- гармонический (50 Гц) и субгармонический (16,6 Гц) феррорезонанс между нелинейной индуктивностью ТН и емкостями конденсаторов, шунтирующих разрывы высоковольтных выключателей;
- субгармонический феррорезонанс при неполнофазных режимах линий электропередачи, когда напряжение попадает на отключенную фазу (вместе с установленным ТН) через междуфазные емкости линии;
- гармонический феррорезонанс при неполнофазных режимах линий электропередачи, когда емкость невключенной фазы резонирует с нелинейной индуктивностью отпаечного силового трансформатора с разземленной нейтралью.[3]

На линии 110 кВ в случае отказа выключателя, разъединителя или из-за обрыва проводов может возникнуть неполнофазный режим. Резонансные напряжения фаза–земля на участках сети с потерей нейтрали могут длительно повышаться относительно номинала в 2,5 раза. Обычные ТН не выдерживают такого большого изменения напряжения. Так же быстро повреждаются и емкостные ТН. Однако антирезонансный ТН-110, устойчивый к такому сверхсильному воздействию, пока еще не созданы.

#### Феррорезонанс в сетях напряжений 220-750 кВ

В сетях с напряжениями 220-750 кВ при неполнофазном режиме тоже возможны повышения напряжения основной частоты, но они не столь значительны, как и в сетях 110 кВ. Практическую опасность для электромагнитных ТН часто представляют феррорезонансы с емкостями конденсаторов, шунтирующих разрывы высоковольтных выключателей. Избавиться от шунтирующих конденсаторов удалось только на новых элегазовых выключателях 220 кВ, а на напряжении 330–750 кВ конденсаторы еще остаются.

Результирующая емкость конденсаторов, шунтирующих один полюс выключателя, может быть весьма значительной – более 1000 пФ. Если после отключения выключателя напряжение источника через эти конденсаторы попадет на ТН, то может возникнуть феррорезонанс.

Известны несколько способов борьбы с феррорезонансом, на основе которых можно разработать антирезонансный электромагнитный ТН 220–750:

- линеаризация характеристики намагничивания путем размыкания магнитопровода;
- повышение потокосцепления насыщения путем снижения номинальной индукции;
- повышение потерь в меди первичной обмотки;
- повышение потерь в стали магнитопровода.[3]

Наиболее опасными являются феррорезонансные явления в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью. К таким классам напряжения относятся городские, сельские, генераторные сети собственных нужд станций. При коммутационных

операциях и однофазных замыканиях на землю, именно в этих сетях, в цепях измерительных трансформаторов напряжения возникают феррорезонансные явления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.news.elteh.ru/arh/2010/62/09.php>
2. ГОСТ 1983-2001. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
3. <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/68/12.php>

### АВТОНОМНАЯ ТЕПЛОНАСОСНАЯ ВЫПАРНАЯ УСТАНОВКА

Гриценко И.В., Буртелов В.А

Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, г. Северск

Выпариванием называют процесс концентрирования жидких растворов практически нелетучих веществ путём частичного удаления растворителя испарением при кипении жидкости. В процессе выпаривания растворитель удаляется из всего объёма раствора, в то время как при температурах ниже температур кипения испарение происходит только с поверхности жидкости. Температура кипения зависит от давления.

Концентрированные растворы и твёрдые вещества, получаемые в результате выпаривания, легче и дешевле перерабатывать, хранить и транспортировать.

Процессы выпаривания могут проводиться при атмосферном, пониженном и повышенном давлениях. Выбор давления связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.

Выпаривание при пониженном давлении имеет определённые преимущества перед выпариванием при атмосферном давлении, несмотря на то, что теплота испарения раствора несколько возрастает с понижением давления. При выпаривании под вакуумом становится возможным проводить процесс при более низких температурах, что важно для сохранения витаминов в сельскохозяйственной продукции. Кроме того, при снижении температуры кипения увеличивается полезная разность температур между греющим агентом и раствором, что позволяет уменьшить поверхность нагрева аппарата.

Выпаривание водных растворов – энергозатратный процесс. Известно, что для испарения одного литра воды в нормальных условиях (атмосферной перегонки) требуется затратить примерно  $1\text{кВт}\cdot\text{ч}$  электрической энергии. Энергия уносится вторичным паром, кроме того требуется расход холодной воды для конденсации пара. Для многих практических применений такая цена непомерна.

Качественно, почти на порядок, повысить энергоэффективность выпарных установок позволяет применение тепловых насосов. Оптимальные рабочие температуры современных тепловых насосов позволяют применять их для выпаривания водных растворов только в составе вакуумных выпарных установок.

В пищевой промышленности известны процессы концентрирования путём вакуумного выпаривания молока, соков и растительной массы диких и культурных ягод и плодов.

Расстояния и транспортная инфраструктура нашей страны затрудняют доставку с/х продукции для централизованной переработки. В данной работе сделана попытка разработать концепцию энергоэффективной выпарной установки, пригодной для применения в фермерском хозяйстве, малом сельском перерабатывающем предприятии

или заготовительной бригаде. Источником энергии для процесса выпаривания служит парокompрессионный тепловой насос.

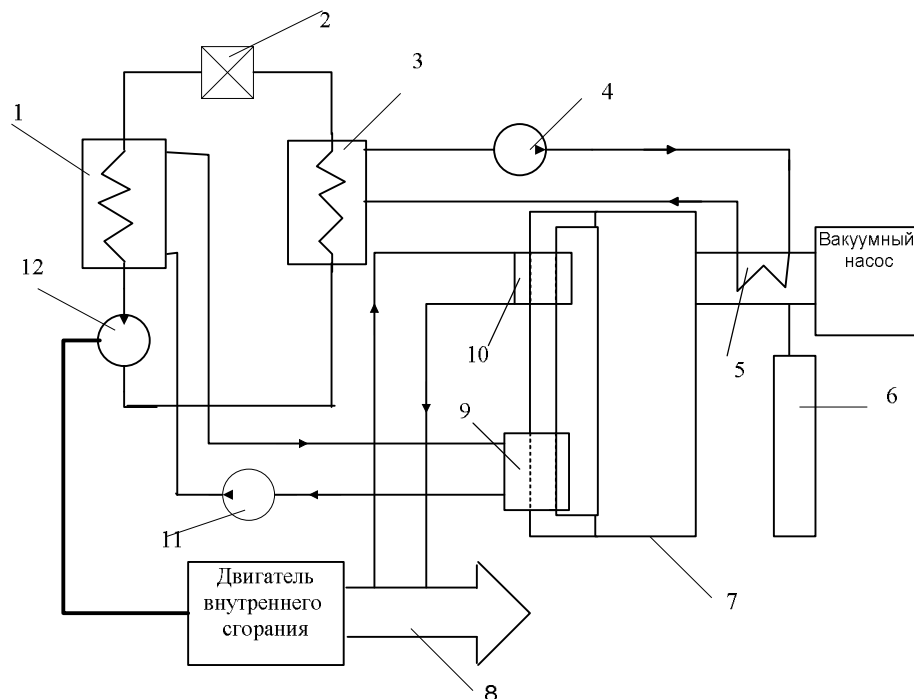
Учитывая недоступность «силовой» электроэнергии в полевых условиях и её крайне низкое качество в сельской местности с одной стороны и «капризность» современных мотор-компрессоров с другой стороны, было решено:

1. обеспечить привод установки от двигателя внутреннего сгорания (ДВС);
2. рассмотреть возможность разместить установку на прицепе автомобиля УАЗ;
3. утилизировать тепловые потоки образующиеся за счёт работы ДВС.

Рассматриваемая установка представляет собой вакуумный выпарной аппарат с расчётной производительностью до 500 л/сутки. Необходимый градиент температур, в основном, создаётся парокompрессионным тепловым насосом. Привод компрессора теплового насоса и вспомогательных агрегатов установки осуществляется от двигателя внутреннего сгорания. Дополнительный греющий потенциал установка получает от утилизации тепловых потерь двигателя – тепла из жидкостной системы охлаждения и тепла отходящих выхлопных газов.

Энергетическая эффективность аналогов – стационарных вакуумных выпарных установок с тепловыми насосами например ЕКОPRIMA 500-CR лежит в интервале (160...90) Вт/л. Примем для нашей установки меньшую энергоэффективность из аналогов –160 Вт/л, для производительности 21 л/ч, необходимая мощность привода 3,4 кВт. Выберем двигатель с номинальной мощностью 5 кВт.

Двигатель имеет номинальную частоту вращения 3600 об/мин и через муфту приводит поршневой сальниковый компрессор – основную нагрузку. Дополнительной нагрузкой является насос для создания вакуума и центробежные насосы горячего и холодного теплоносителя. Электронный блок управления и устройства автоматики питаются от сети 12В генератора двигателя. Схема установки изображена на Рис. 1.



**Рис. 1.** Схема установки автономной теплонасосной выпарной установки:  
1-горячий теплообменник, 3-холодный теплообменник, 2-расширительное устройство теплового насоса, 4-насос холодного теплообменника, 5-конденсатор вторичного пара, 6- емкость для конденсата, 7-выпарной аппарат, 8-Тепловые потери двигателя, 9, 10- теплообменники, 11-насос горячего теплообменника, 12-компрессор теплового насоса

Парокомпрессионный цикл теплового насоса реализуется на хладоне R22.

Выпарной аппарат строится по схеме с внешним кипятильником.

Обогрев кипятильника и охлаждение конденсатора выпарной установки осуществляется промежуточным теплоносителем. Теплообмен хладон – промежуточный теплоноситель производится в объёмных теплообменниках. Это решение обеспечивает модульность установки и при дальнейшем развитии построение унифицированного ряда модулей выпарных аппаратов оптимизированных для различных применений.

Предварительная конструктивная проработка показала возможность размещения установки на шасси двухосного бортового прицепа к автомобилю УАЗ. Так же существует возможность размещения оборудования на прицепе трактора.

Таким образом, авторами на примере установки для первичной переработки пищевого сырья в местах, приближенных к районам его производства и сбора, сформулирована и проанализирована концепция построения автономных мобильных выпарных установок.

Основным преимуществом предлагаемых установок является их мобильность – возможность оперативного перемещения и развёртывания вблизи мест наличия сырья, либо потребления продукта (например: водоочистительный вариант). Установка для своей работы потребляет только один вид внешних ресурсов – моторное топливо (в необходимых случаях может быть заменено газом). Установка не зависит от электроснабжения и не нуждается в источнике охлаждающей воды. В дополнение к достоинствам изначально присущим теплонасосной схеме в концепции предусмотрены дополнительные меры повышения энергетической эффективности – сокращение числа этапов преобразования энергии в сравнении со стационарными установками, питаемыми электроэнергией Рис.2. и вариантом мобильной установки, питаемой от мобильных источников электроэнергии.



Рис. 2. Этапы преобразования энергии

Утилизация тепла, выделяющегося в ДВС и тепла выхлопных газов, дополнительно повышает энергоэффективность установки. Эти меры при сопоставимом техническом уровне реализации позволяют улучшить топливную экономичность процесса в 1,5 – 2 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Сакун И.А., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины.- Под общ. ред. Л.С. Тимофеевского. - СПб.: Политехника, 1997.-992 с.
2. <http://www.schell-eurasia.com/models.html>
3. <http://kopeysk.all.biz/vakuumnye-ustanovki-s-ispolzovaniem-teplovogo-g2297887>

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОВЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Усачёв И.В. Тепляков В.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Газоизолированные линии второго поколения для передачи электроэнергии высокой мощности являются наилучшим решением там, где природные или инфраструктурные условия не позволяют прокладывать воздушные линии электропередачи.

Основными достоинствами систем GIL (линии электропередачи с газовой изоляцией) являются их высокая пропускная способность, которая значительно превышает пропускную способность кабельной линии и, по крайней мере, в два раза выше пропускной способности воздушной линии электропередачи. Так же у GIL очень низкая по сравнению с другими системами электропередач электромагнитная совместимость (EMC), токопроводы создают значительно меньшее электромагнитное возмущение в окружающей среде. Низкий уровень потерь, высокая степень безопасности (отсутствие опасности возгорания) и высокая адаптивность к окружающим условиям при прокладке. По сравнению с воздушными линиями электропередачи и кабельными линиями магнитное поле вокруг токопроводов при прочих равных условиях составляет примерно 10% и менее. Имеется и ряд других достоинств токопроводов, например, малая индуктивность.

GIL не подвержена влиянию высокой температуры воздуха, активному воздействию солнечных лучей или атмосферному загрязнению (такому как пыль, песок или высокая влажность). Использование антикоррозионной защиты не является строгой необходимостью.

Система GIL может проходить по поверхности грунта, через туннели, либо лежать в толще земли, в зависимости от индивидуальных требований заказчика. Тем не менее, токопроводы имеют дополнительное преимущество в связи с тем, что их трассировка возможна фактически с нулевым радиусом поворота.

Газовые (газоизолированные) линии электропередач, а также полностью герметизированные комплектные подстанции получили распространение с начала 60-х годов, хотя о высокой электрической прочности многих электроотрицательных газов было известно уже в 30-е годы. В Советском Союзе еще в 40-х годах были проведены широкие исследования электрической прочности электроотрицательных газов, в том числе и элегаза SF<sub>6</sub>, который и получил преимущественное применение в технике передачи электрической энергии. Это произошло потому, что элегаз в однородном электрическом поле в 2 – 5 раз прочнее воздуха или азота, будучи химически чистым,

он совершенно безвреден для обслуживающего персонала, инертен, великолепный теплоотвод, хорошая дугогасящая среда, не горюч. Многие эти свойства объясняются его особым химическим строением: молекула элегаза представляет собой октаэдр с шестью прочными ковалентными связями, обеспечивающими особую прочность его молекуле.

Для получения высокой электрической прочности требуется большое давление газа. Но увеличение рабочего давления не должно приводить при минимальной зимней температуре к сжижению газа. У элегаза при небольших давлениях 0,4 МПа температура сжижения близка к  $-40^{\circ}\text{C}$ . Исходя из этого, давление для надземной элегазовой линии не должно превышать 0,35...0,4 МПа. Для подземной линии с толщиной земляного покрова соответствующей глубине промерзания, максимальное рабочее давление может быть повышено до 1 МПа, что соответствует температуре сжижения  $-10^{\circ}\text{C}$ . Однако при таком высоком рабочем давлении были бы затруднены зимние ремонтные работы на линии, что неприемлемо с эксплуатационной точки зрения. Так как протяженность газовых линий будет увеличиваться, а стоимость элегаза относительно высока, наряду с элегазом можно использовать его смесь с азотом, хотя для этого потребуются увеличение рабочего давления, усложняющее проблему обеспечения герметичности линии в целом, но это не ведет к снижению температуры сжижения смеси, так как у нее эта температура значительно ниже, чем у чистого элегаза (смотри рисунок 1.), из-за очень низкой температуры сжижения азота.

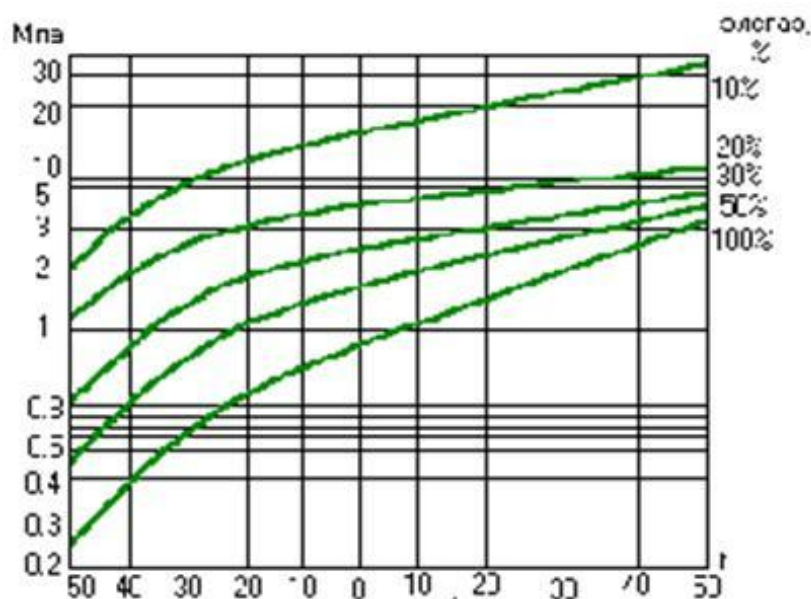


Рис. 1. График зависимости температуры от мощности

Представим теперь в общих чертах устройство газовой линии электропередачи. Это чаще всего система трех токопроводов из алюминиевых (медных) труб, каждый из которых помещен коаксиально в оболочку (трубу), заполненную газом (рис.2).





**Рис. 2.** Устройство газовой линии

Возможно размещение трех токопроводов всех трех фаз в одной оболочке. Опора токопровода осуществляется изоляторами. Оболочка выполняется из алюминия или его сплавов. Транспортбельные секции таких линий имеют небольшую длину (10-15 м) и являются жесткими, поэтому газовые линии нельзя называть кабельными. В ряде стран ведутся работы по созданию гибких элегазовых кабелей с гофрированными оболочками и токопроводами.

#### **Разнообразие применения и методов прокладки GIL**

##### **1. Надземная прокладка**

Надземная прокладка GIL – беспроблемный способ эксплуатации даже в экстремальных природных и климатических условиях. GIL не подвержена влиянию высокой температуры воздуха, активному воздействию солнечных лучей или атмосферному загрязнению (такому как пыль, песок или высокая влажность). Использование антикоррозионной защиты не является строгой необходимостью. При помощи данного способа прокладки достигается наиболее высокая пропускная способность при передаче электроэнергии.

##### **2. Туннельная прокладка**

Туннели состоят из предварительно изготовленных элементов, что является частью технологии ускорения и облегчения прокладки системы GIL. Элементы туннеля собираются в траншее, для засыпки используется ранее выкопанный грунт, что предотвращает долгосрочное нарушение внешнего вида ландшафта. Сразу по завершении туннельных работ, производится прокладка системы GIL. При таком методе установки почва на поверхности, под которой проложена система, может быть полностью возвращена под нужды землепользования. Воздействие GIL на этот участок ограничивается выделением небольшого количества тепла, поступающего в почву. Обеспечивается легкость доступа к установке для осуществления осмотра, а также высокая пропускная способность.

##### **3. Вертикальная прокладка**

Элегазовые трубопроводы могут без труда быть установлены под любым углом, и даже в вертикальном положении. Это делает их идеальным решением в особенности в случае гидроэлектростанций, где большие объемы энергии необходимо передать от подземного трансформатора к распределительному устройству и воздушной линии электропередачи на поверхности. Так как системы GIL не подвержены риску возгорания, они могут быть установлены в легкодоступном туннеле или шахте, которые одновременно могут быть использованы для вентиляции.

#### 4. Подземная прокладка

Также имеются решения для непосредственной прокладки GIL в грунте. Подобные системы покрыты сплошным слоем полиэтилена с целью обеспечения сохранности антикоррозионного алюминиевого сплава корпуса, что позволяет надежно защитить проложенную в грунте систему на протяжении более 40-ка лет. Благодаря тому, что магнитные поля вокруг установок GIL являются незначительными, по завершении работ земля может быть далее использована для нужд сельского хозяйства при минимальных ограничениях.

#### 5. Типичные проекты

Для гидроаккумулирующей электростанции Лимберг II в г. Капруне (Австрия), построенной в 2010 г., GIL была проложена в шахте под углом 42°[4]. Она соединяет подземную электростанцию с воздушной линией электропередачи напряжением 380 кВ, находящуюся на высоте более 1600 метров. Так как системы GIL не подвержены риску возгорания, туннели GIL не только легкодоступны, но и могут быть использованы в целях вентиляции. Это позволило значительно сэкономить расходы за счёт отсутствия необходимости второй шахты.

Типичным примером низкого уровня электромагнитных полей является проект PALEXPO в г. Женеве (Швейцария). Система GIL, расположенная в туннеле, заменила 500 метров двойной воздушной линии 300 кВ, которую пришлось перенести ради возводимого здания выставочного центра. Энергокомпания обосновала свое решение в пользу использования GIL вместо кабеля значительно лучшими показателями в части электромагнитной совместимости. Теперь в новом помещении выставки может выставляться и эксплуатироваться исключительно чувствительное электронное оборудование без риска возникновения помех со стороны линии электропередачи 300 кВ, расположенной под ним.

**Производство и установка GIL компанией Siemens.** Компания Siemens является безоговорочным лидером на рынке производства, улучшения и строительства GIL.

GIL производства «Сименс» была проложена в туннеле гидроаккумулирующей электростанции в регионе Шварцвальд уже в 1975 году. При однофазной длине GIL почти 4 км этот проект – по сей день одна из важнейших референций в мире. Проверка после 30-и лет эксплуатации показала, что все компоненты по-прежнему в отличном состоянии, и система будет надежно работать еще многие годы.

Из-за своих конструктивных особенностей, системы GIL производства «Сименс» пригодны в различных условиях. Еще более высокая пропускная способность и низкий уровень потерь дают возможность осуществлять прямое подключение GIL к ЛЭП, продолжая линию под землей. Из-за низкой электрической емкости GIL, обычно нет необходимости в компенсационных реакторах даже на особо длинных отрезках GIL (до 70 км). Технические особенности GIL компании «Сименс» позволяют реализовать АПВ (автоматическое повторное включение) воздушных ЛЭП, так что нет нужды в изменении концепции защиты. По тем же причинам возможно и прямое подключение GIL к подстанциям или трансформаторам.

Репутация систем GIL компании «Сименс» заслужена как их техническими параметрами, так и высокой эксплуатационной надежностью. GIL надежно защищены от многих негативных воздействий, которым подвержены другие системы передачи электроэнергии. Прикосновение к частям работающей системы абсолютно безопасно, ее корпус надежно заземлен.

При монтаже в первую очередь необходимо обеспечить герметичность соединения компонентов. Для этого компания «Сименс» применяет процесс автоматической сварки с компьютерным управлением. Сварочный робот обеспечивает наивысший уровень

точности и воспроизводимости сварочных швов. Каждый шов подвергается 100-процентной ультразвуковой проверке, что гарантирует идеальную газоплотность и механическую прочность, а значит, нет необходимости в дополнении элегаза на протяжении всего более чем 50-летнего срока эксплуатации.

Выводы. GIL имеют множество преимуществ над остальными источниками электропередачи:

- высокий уровень передающей мощности (пропускная способность до 3700 МВА на одну цепь);
- высокая перегрузочная способность;
- пригодность к передаче на большие расстояния (70 км и более без компенсации реактивной мощности);
- хорошая способность выдерживать КЗ;
- невозгораемость; отсутствие риска возгорания в случае отказа;
- особо низкий уровень электромагнитного поля;
- практически отсутствие старения.

Но также GIL имеют значительный недостаток, это высокая стоимость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тиходеев Н.Н. Передача электрической энергии. /под ред.В.И.Попкова.-2-е изд.- Л.: Энергоатомиздат, 1984г.
2. Александров Г.Н. Передача электроэнергии.- Л.:Энергия, 1980г.
3. Сайт <http://www.energy.siemens.com>

## КРУГЛЫЙ СТОЛ 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

---

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМЫХ ВАКУУМНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Качесов В.Е., Петухов А.Е., Финашин Р.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

#### **Введение**

В настоящее время вакуумные электрические аппараты получили повсеместное распространение в электрических сетях, особенно на номинальное напряжение 6...35 кВ. По многим техническим характеристикам вакуумные выключатели в указанном диапазоне напряжений превосходят маломасляные. Наряду с выключателями на указанные классы напряжения разработаны также управляемые вакуумные разрядники (РВУ), которые могут применяться в распределительных сетях для импульсного заземления нейтрали [1,2].

Режим заземления нейтрали в распределительных сетях является исключительно важным вопросом при их проектировании и эксплуатации. Он определяет кратность и длительность дуговых перенапряжений, а также уровень электробезопасности самой сети. Резистивный способ заземления нейтрали, известный еще с начала прошлого века, может применяться в России согласно ПУЭ и ПТЭ в сетях с малыми емкостными токами замыкания на землю (ЕТЗЗ), максимальные значения которых устанавливаются выше указанными нормативными документами. К недостаткам высокоомного резистивного заземления следует отнести:

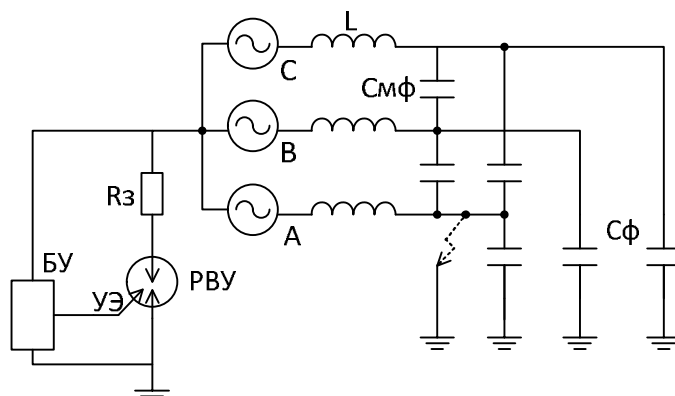
- увеличение установившегося тока замыкания на землю, что снижает электробезопасность сети;
- появление на подстанции греющегося оборудования (резистора мощностью 30–400 кВт), особенно, если резистор находится в ЗРУ;
- дополнительные потери;
- ухудшение самогашения заземляющей дуги.

Отмеченные недостатки устраняются посредством предложенного и запатентованного способа импульсного резистивного заземления нейтрали, в котором резистор заземляется только при дуговых замыканиях на землю, а при устойчивом замыкании он автоматически отключается от нейтрали сети.

В качестве коммутационного аппарата, соединяющего резистор с контуром заземления станции/подстанции, может выступать тиристор, либо РВУ. Последний обладает рядом преимуществ: коммутационный аппарат (ключ) содержит всего один элемент, потери в ключе предельно малы, высокие надежность и ресурс аппарата.

РВУ представляет собой безнакальный трехэлектродный герметизированный прибор с давлением остаточных газов, не превышающим  $10^{-4}$  Па. Его включение осуществляется подачей пускового импульса напряжения на управляющий электрод (Рис. 1. Схема распределительной сети). Управляющий импульс напряжения вызывает пробой по поверхности диэлектрической вставки узла поджига и генерацию инициирующего искрового разряда. Искровой разряд поддерживается катодными пятнами, которые формируются вблизи поверхности диэлектрической вставки. Они являются источником сильно ионизированной металлической плазмы, которая

распространяется в вакуумный зазор. Когда плазма заполняет вакуумный промежуток, разряд переходит из искровой стадии в дуговую, и разрядник включается [3-5].



**Рис. 1.** Схема распределительной сети с импульсным заземлением (БУ – блок управления, Rз- заземляющий резистор)

### Исследование характеристик РВУ

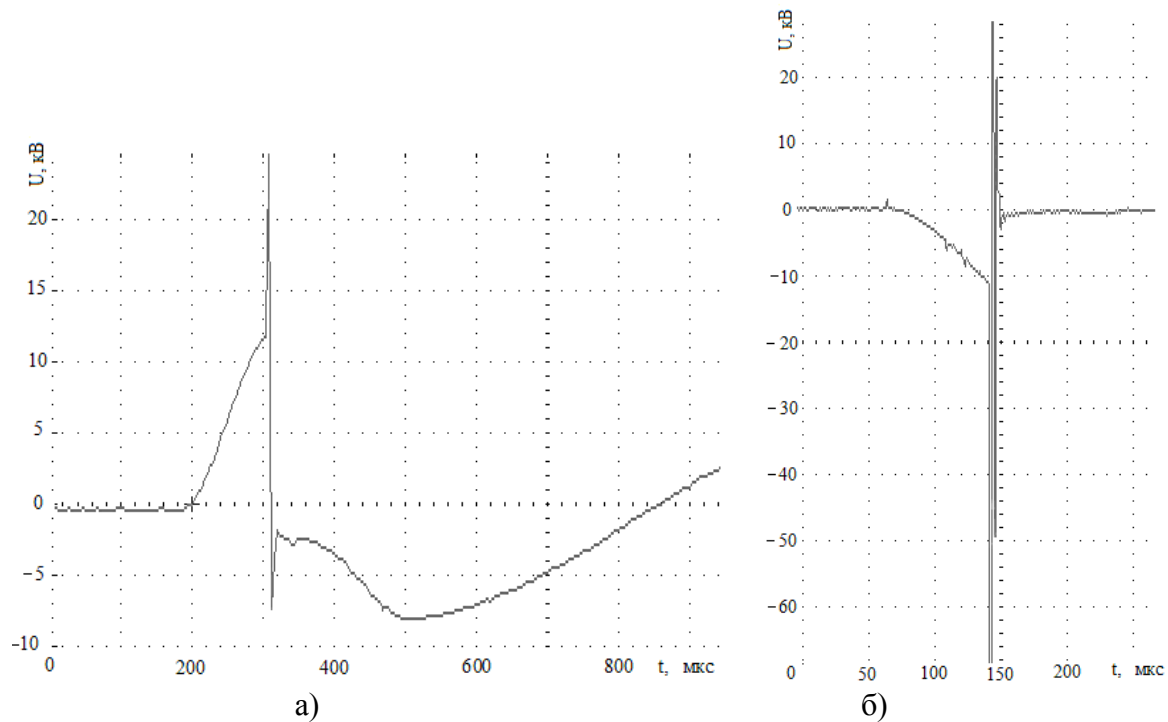
Для применения РВУ в качестве ключа, соединяющего заземляющий резистор с контуром заземления, необходимо определить возможность его включения/запуска и поддержания в нем малого разрядного тока.

Для запуска РВУ разработана специальная запальная схема, генерирующая импульс напряжения амплитудой  $\sim 12$  кВ. Длительность полупериода колебаний запального импульса составляет  $t=0.14$  мкс, начальная амплитуда поджигающего тока -  $I=295$  А, а энергия запуска -  $Wз \approx 100$  мДж.

Проведенные испытания показали, что разрядник РВУ-73 работает нестабильно при малых разрядных токах ( $I_p \approx 50$  А, напряжение  $U=10...12$  кВ), - в ряде случаев не происходит разрядка батареи конденсаторов генератора импульсных токов (ГИТ). Вероятность срабатывания разрядника составила -  $\sim 0.3$ . При этом инициирование разряда в канале УЭ - условный катод происходило во всех случаях. Снижение разрядного сопротивления и увеличение начального разрядного тока до  $I_p \approx 300$  А радикально увеличило вероятность формирования основного разряда, которая близка к 1. Типичные осциллограммы напряжения на УЭ показаны на (Рис. 2. Осциллограммы импульсов).

Анализ результатов показал, что для рассматриваемой задачи (коммутации заземляющего сопротивления  $Rз$ ) необходим РВУ с другими характеристиками. Возможной причиной маловероятного запуска основного разряда при незначительном разрядном токе является малая длительность и, соответственно, малая энергия запускающего импульса. Увеличение этих параметров усиливает ионизационные процессы в запальном и основном разрядных промежутках, увеличивая вероятность инициирования основного разряда.

При испытаниях РВУ проявляется одно из его свойств: отсутствие основного разряда после подачи запускающего импульса приводит к «натренировке» РВУ - заметному возрастанию запального напряжения на УЭ. В связи с этим работа РВУ с разрядными токами ниже минимально допустимых нежелательна, поскольку ведет к необходимости повышения напряжения и энергии запускающего импульса.



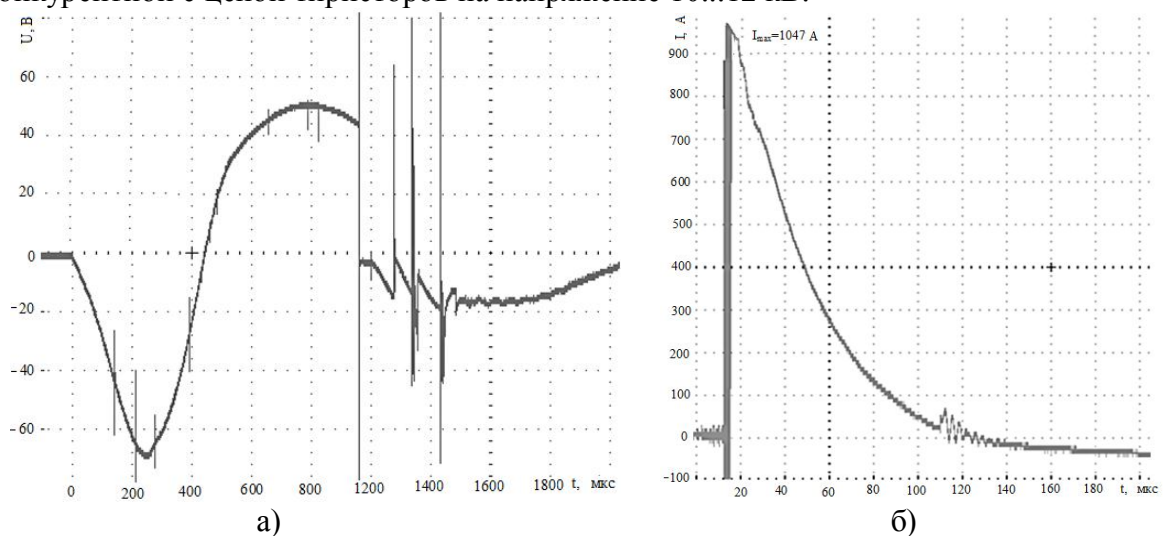
**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов:

а) – отсутствие основного разряда; б) – пробой разрядника

Для дальнейшего потенциального применения РВУ в качестве коммутирующего устройства в системах импульсного заземления нейтрали распределительной сети необходимо сформировать к нему технические требования. В качестве таковых основных требований следует отметить:

- напряжение поджига (запуска) РВУ должно быть ограничено значением 1-2 кВ;
- энергия поджигающего импульса должна быть минимальна;
- минимальный коммутируемый ток (основного разряда) -20...40А.

Наряду с указанными техническими требованиями цена разрядника должна быть конкурентной с ценой тиристоров на напряжение 10...12 кВ.



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов: – а) – поджигающий импульс (коэффициент деления делителя напряжения  $K_d=68000/220$ ); б) - осциллограмма разрядного (основного) тока

#### Заключение

1. В устройствах импульсного заземления нейтрали распределительных сетей применение современных РВУ ограничивается их минимально допустимым током. Для серийно выпускаемого РВУ-73 значение этого тока превышает 50 А при энергии запускаящего импульса  $W_3=100$  мДж.
2. Отсутствие основного разряда в виду повышенного разрядного сопротивления (или сниженного напряжения на РВУ) при наличии запускающих импульсов приводит к «натренировке» запального промежутка, приводящего к увеличению его разрядного/запального напряжения.
3. Для устройств импульсного заземления нейтрали распределительных сетей целесообразна разработка специализированных РВУ, ориентированных на малые токи и малые энергии поджигающих импульсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на полезную модель: РФ № 117738 (от 23.12.2011), Н02Н9/00. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети/ В.Е. Качесов, А.Е. Петухов// БИ №18, 2011.
2. Патент на изобретение: РФ № 2454769 (от 19.05.2011), Н02Н9/00. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети/ В.Е. Качесов// БИ №18, 2012.
3. Алферов Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А., Хабаров Д.А., Применение управляемых вакуумных разрядников в высоковольтном быстродействующем защитном устройстве// Приборы и техника эксперимента. — 2004. — №3. — С. 94 — 101.
4. М.И. Баранов Применение новых вакуумных коммутаторов в силовых цепях мощных высоковольтных электрофизических установок и схемах аварийной защиты силового электрооборудования// Электротехника и электромеханика . — 2009. — №3. — С. 5—10.
5. Интернет-ресурс: <http://vei-avis.ru/>

#### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

Адамчук А.В.

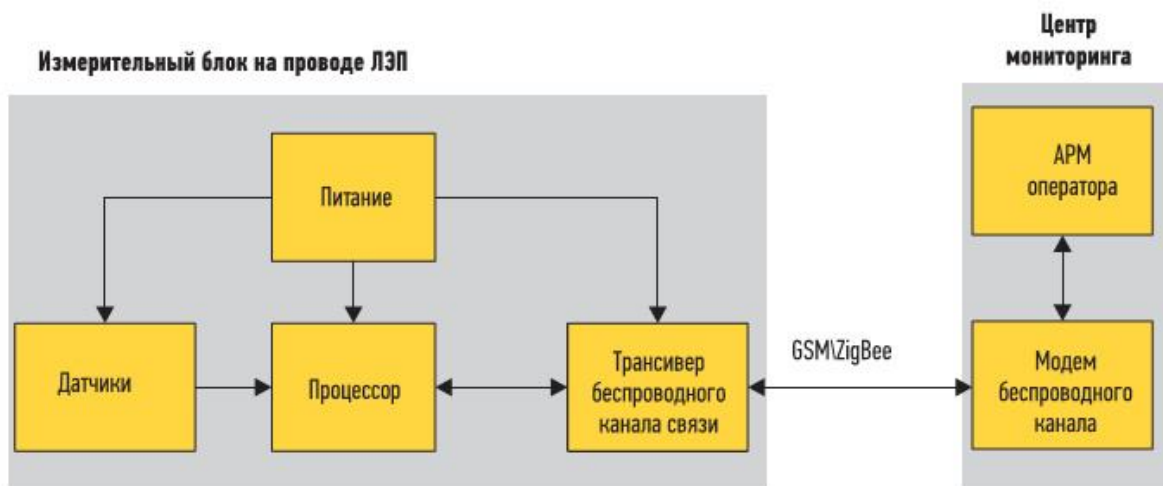
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Транспортировка электроэнергии от электростанции к потребителям является одной из важнейших задач энергетики. Электроэнергия поставляется преимущественно по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП), которые состоят из кабельных линий и оборудования для преобразования энергии и согласования с нагрузкой. Эффективность и надежность передачи энергии определяется состоянием сетей электроснабжения. Мониторинг воздушных ЛЭП позволяет решить многие проблемы в этой области.

При транспортировке электроэнергии через каждую конкретную ЛЭП регламентированы допустимые токовые нагрузки. При этом используются предельные значения тока, определяющие провис проводов выше критического. Эти данные взяты для самых экстремальных условий, которые более чем в 90% времени эксплуатации ЛЭП не встречаются. Следовательно, имеется ресурс для пропускания больших мощностей без нарушения регламента. То есть можно передавать дополнительную мощность (15–30%) практически в 90% времени эксплуатации. Наличие системы мониторинга позволяет без уменьшения регламента по надежности использовать этот дополнительный ресурс. Для этого необходимо контролировать уровень тока и

температуру проводов по всей трассе и в соответствии с реальным состоянием линии динамически регулировать уровень передаваемой мощности.

**Структура систем мониторинга воздушных электросетей.** В настоящее время во всем мире находят широкое применение различные системы мониторинга воздушных и кабельных ЛЭП, обеспечивающие системного оператора подробными сведениями о текущем состоянии воздушных и кабельных сетей электроснабжения. Система мониторинга состоит из сети измерительных блоков, связанных через канал связи с оборудованием на диспетчерском пункте. Измерительные блоки распределены вдоль трассы ЛЭП и монтируются на опорах либо непосредственно на высоковольтных проводах. На рисунке 1 показана структура системы мониторинга пропускной способности проводов ЛЭП.



**Рис. 1.** Система мониторинга проводов ЛЭП

Диспетчерские пункты расположены в узловых точках сетей перераспределения энергии. В настоящее время в них, как правило, используются SCADA системы, обеспечивающие обработку и интерпретацию полученных от данных измерительных блоков. В измерительный блок входят следующие базовые компоненты:

- группа датчиков для измерения основных текущих параметров проводной линии;
- процессорный модуль для обработки измеренных данных;
- система передачи данных;
- модуль автономного питания.

В зависимости от функционального назначения в системах мониторинга могут использоваться различные типы датчиков:

- для измерения тока в проводе;
- температуры провода в полете;
- механического напряжения провода в точках подвеса (тензодатчики);
- для измерения затухания в оптических волокнах грозотроса или фазного провода;
- для измерения критических стрел провеса;
- климатических условий (метеостанция);
- вибрационных характеристик проводов (акселерометры).

Измерение тока осуществляется бесконтактным методом, для чего используются датчики на основе эффекта Холла или катушки Роговского.

**Система питания автономных измерительных блоков.** В настоящее время для питания измерительных блоков систем мониторинга воздушных линий (ВЛ) используется два варианта. Для измерительных систем, размещаемых на мачтах опор



ЛЭП, как правило, используются аккумуляторные батареи, подзаряжаемые от солнечных батарей. Для измерительных модулей, монтируемых непосредственно на проводах ЛЭП, питание производится от токового трансформатора.

Токовый трансформатор преобразует энергию непосредственно из провода ЛЭП. В качестве источника возбуждения (первичная обмотка трансформатора) используется токонесущий провод ЛЭП. Вторичная обмотка трансформатора – тороидальная катушка с ферромагнитным сердечником. Модуль индукционного источника питания состоит из токового трансформатора, выпрямителя, аккумулятора энергии и преобразователя напряжения, который обеспечивает работу всех цифровых и аналоговых узлов измерителя.

Датчики и системы слежения осуществляют мониторинг погодных условий вдоль линий электропередачи, оценивают состояние проводов и изоляции ЛЭП, определяют наличие гололеда на проводах ЛЭП, определяют наличие коронного разряда на проводах, выявляют и локализуют влияния гармоник.

#### Заключение

Потребность в увеличении энергии вынуждает энергосистемы использовать силовые провода и кабели на пределе их физических возможностей, а интересы безопасности и эффективности имеют огромное значение для операторов, которым важно знать, какие процессы происходят вдоль воздушной ЛЭП (локальный нагрев, критическая раскачка проводов, критический провес, обледенение). Системы мониторинга воздушных ЛЭП обеспечивают дополнительные функции, позволяют повысить эффективность передачи электроэнергии и уменьшить потери. Мониторинг не только обеспечивает повышение надежности транспорта электроэнергии, но и способствует уменьшению расходов на обслуживание линий электропередачи за счет более оперативных и точных данных при локализации аварийных сегментов, а также прогнозирования проблемных ситуаций на трассе. Использование перспективных систем мониторинга воздушных электросетей в последнее время стало особенно актуальным в России, поскольку, во-первых, существенно возросла стоимость ущерба при крупных авариях, а во-вторых — в связи с уменьшением надежности энергосистем вследствие сильного износа как используемого оборудования, так и проводных линий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин А. В., Рыгалин Д. Б., Шкляев А. А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП // Естественные и технические науки. – 2012. – № 1, 2. – С. 39-42.
2. Жиленков Н. Новые технологии беспроводной передачи данных // Современные технологии автоматизации. – 2003. – № 4.
3. Эффективные инженерные решения по повышению пропускной способности ВЛ на основе применения системы мониторинга тока и температуры проводов, математического моделирования поведения элементов линий в различных режимах эксплуатации // Материалы презентации МРСК Холдинг.
4. <http://controlengrussia.com/otraslevye-resheniya/sovremenny-e-tehnologii-monitoringa-vozdushny-h-e-lektrosetej-le-p>

## **К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ КАБЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЧЕСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА**

Котов В.В., Щербакова Ю.М.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В последние годы широко внедряется частотный способ плавного регулирования электроприводов, построенных на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Данный способ основан на использовании преобразователей частоты (ПЧ). Силовая часть такого ПЧ состоит из регулируемого выпрямителя, фильтра и автономного инвертора на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Большими преимуществами использования частотных преобразователей являются высокая точность и возможность постоянно управлять крутящим моментом и скоростью двигателя. Однако у такой системы управления есть существенные недостатки: сильное электромагнитное излучение и большие перенапряжения в кабеле питания электродвигателя.

Высокий уровень электромагнитных помех обусловлен очень короткими интервалами включения и выключения БТИЗ и высокой частотой импульсов частотного преобразователя (до 20 кГц). Это приводит к искажению синусоидальности напряжения на выходе преобразователя. Сильное электромагнитное излучение, обусловленное в значительной мере кабелем питания электродвигателя, вызывает наводки на элементы распределительной сети, устройства и информационные сети. Хорошее экранирование кабелей обеспечивает нейтрализацию этого излучения.

Другой проблемой являются возросшие электрические нагрузки на систему изоляции. Напряжение, генерируемое преобразователем частоты, имеет основную волну приблизительно синусоидальной формы с частотой от 0 до 400 Гц в зависимости от скорости вращения. Однако в процессе работы также образуются более высокие гармоники на частотах примерно до 100 МГц. Сигнал основной частоты и более высоких гармоник передается по кабелю питания к электромотору.

В процессе работы на концах кабеля возможно образование импульсных волн, которые в свою очередь создают перенапряжения вследствие отражения гармоник (т.н. эффект отраженной волны). Этот эффект возникает когда длина кабеля питания превышает длину волны гармоники. Если длина меньше длины волны гармоники, то переходные процессы проявляются на выходе частотного преобразователя. В результате генерируется напряжение, превышающее номинальное напряжение электромотора в 2 – 3 раза, что создает чередующие нагрузки на полимерную изоляцию. Этот фактор должен учитываться при конструировании изоляции кабеля, чтобы избежать повреждений (например, прогорания изоляции вследствие образования дуги между жилой и экраном).

Помимо этого, перенапряжения, действуя с частотой до 10-4 с, могут в 10 раз превышать значение питающего напряжения. Как следствие резко снижается срок службы питающего кабеля. В последнее время рядом ведущих зарубежных кабельных компаний уже разработаны и выпускаются специальные кабели для частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией. В настоящее время в РФ работы по созданию подобной конструкции находятся на начальной стадии. Не достаточно информации о эксплуатации систем частотно-регулируемого привода, о методах и критериях оценки стойкости к перегрузкам, способах и средствах защиты от коронных разрядов. В ходе выполнения проекта планируется разработать кабельные изделия, адаптированные для работы в частотно-регулируемом приводе с широтно-импульсной модуляцией, а также рекомендаций по их применению.

## ИЗМЕНЕНИЕ СООТНОШЕНИЙ СРЕДНЕЙ ЦЕНЫ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ И ЦЕНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ С 1986 ПО 2014 ГГ

Фролов А.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В статье представлены результаты проведенных исследований по изменению средней цены обмоточных проводов марок ПБ и АПБ и цены электротехнической стали марки 3405.

При расчете стоимости трансформатора с целью экономического сравнения ряда рассчитанных вариантов по методу приведенных затрат достаточно учесть стоимость лишь тех его частей и узлов, размеры, количество и стоимость которых могут изменяться от одного варианта к другому. Например, в масляных трансформаторах, как правило, при расчете различных вариантов изменяются размеры и масса магнитной системы (магнитопровод) и системы обмоток. Например, магнитопровод собирается из отдельных тонких пластин электротехнической стали марки 3405, а система обмоток выполняется из медных или алюминиевых обмоточных проводов, соответственно марок ПБ и АПБ. Проведем исследование по изменению цен этих активных материалов с 1986 по 2014 гг. В таблице 1 представлены результаты проведенных исследований.

**Таблица 1.** Средняя цена обмоточных проводов и цена электротехнической стали

Год	1986	2014
Медный обмоточный провод, руб/кг	1,35	356
Алюминиевый обмоточный провод, руб/кг	1,23	167,38
Электротехническая сталь, руб/кг	0,902	65

Проанализируем соотношения этих цен активных материалов. В таблице 2 представлены результаты расчетов.

**Таблица 2.** Соотношения этих цен активных материалов

Год	1986	2014
Медный обмоточный провод / Алюминиевый обмоточный провод	1,1	2,1
Медный обмоточный провод / Электротехническая сталь	1,5	5,5
Алюминиевый обмоточный провод / Электротехническая сталь	1,4	2,6

По таблице 2 видно, что соотношение медного обмоточного провода к алюминиевому обмоточному проводу возросло в два раза.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование алюминиевого провода вместо медного при изготовлении активной части силового трансформатора приведет к уменьшению расхода активных материалов в два раза. И в целом к значительному снижению стоимости силового трансформатора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 6 изд., стереотипное. – Издательский дом Альянс, 2009. – 528 с.: ил.
2. [www.elma-pskov.ru](http://www.elma-pskov.ru)
3. [www.gk-graf.uaprom.net](http://www.gk-graf.uaprom.net)

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### СЕКЦИЯ 1.

#### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

---

<b>ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ С ЦЕЛЮ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА</b>	
Васильев И.С.* Ефермов С.В.* Ким В.С. ....	4
<b>ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО БЛОКА СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ</b>	
Трофимов В.В., Пашали Д.Ю. ....	8
<b>К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ГИБРИДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ</b>	
Хакимова А. Р. ....	11
<b>МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ МИКРОГЭС</b>	
Номоконова Ю. А. ....	14
<b>ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КАПИЛЛЯРНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ</b>	
Леонтьев А.М., Айгузина В.В. ....	18
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВЕНТИЛЯТОРОВ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ</b>	
Поляков А.С. ....	20
<b>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАНГЕНСАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ</b>	
Вавилов В.Е., Якупов А.М, Бекузин В.И. ....	23
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КАБЕЛЕЙ К СТАРЕНИЮ В УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЯХ</b>	
Матери Т.М., Ким В.С., Стариков А.Н. ....	26
<b>РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА МАМДАНИ НА ATSAM 3N4C</b>	
Шуленков Р.А., Другак А.В. ....	29
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОГРУЖНОГО ТРАНСФОРМАТОРА</b>	
Динь Конг Кюи ....	33
<b>ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С МАГНИТОПРОВОДОМ ИЗ АМОРФНОГО ЖЕЛЕЗА</b>	
Габдрахманова А.А., Мирзянов Р.Р. ....	36

<b>АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ПОВЫШЕННОЙ ЖИВУЧЕСТЬЮ</b> Иванов К.В. ....	39
<b>ДИАГНОСТИКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДОБАВОЧНОМУ ТОКУ КОММУТАЦИИ</b> Кулибаба М.В. ....	42
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ТРАНСФОРМАТОРОВ</b> Михеев А.Ю. ....	43
<b>ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ ДЛЯ ОБМОТОК ЧРП</b> Солдатенко Е.Ю., Чарков Д.И. ....	46
<b>УЛУЧШЕНИЕ ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ</b> Романюк В. С., Шитик А. М. ....	47
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ</b> Хабирова И.Ф. ....	50
<b>ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМАХ НИЗКОВОЛЬТНОЙ МЕЖВИТКВОЙ ИЗОЛЯЦИИ</b> Рогожникова Ю.В. ....	54
<b>ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ</b> Латыпов А.Р., Исмагилов Р.Р. ....	57
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ</b> Цой А.Н. ....	60
<b>ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ШАХТНОГО ВЕНТИЛЯТОРА</b> Кашеутов Д.В. ....	62
<b>ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ МОНТАЖНОГО ПРОВОДА</b> Болгова В.А. ....	64
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ</b> Прокопенко А.О. ....	66
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИВОДА МАЛОМОЩНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗГОНЕ И ТОРМОЖЕНИИ</b> Морозова М. П., Чернышева А. Е., Берега М.В. ....	68
<b>ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПОВЕРКА ПРУЖИННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ</b> Бабичев А.В. ....	72

<b>ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ</b> Ямалов И.И. ....	75
<b>ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКАХ РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ</b> Ершов И.С. ....	78
<b>МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ И ПОСЛЕ</b> Черватюк А. В. ....	81
<b>АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСОВ</b> Коробков А.А. ....	84
<b>КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ</b> Абрамовская А.В. ....	87
<b>УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЕМ ОТДЕЛЬНОГО НАСЕЛЁННОГО ПУНКТА НА ОСНОВАНИИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА</b> Мошнориз Н.Н., Довганич А.Н. ....	89
<b>ВРАЩЕНИЕ РОТОРА МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПИТАНИИ</b> Самодуров И.Н., Ляпунова М.В. ....	94
<b>ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТНО- ИМПУЛЬСНОГО ПРЕССОВАНИЯ ОКСИДНОЙ НАНОКЕРАМИКИ</b> Дуданец А.А., Ивашутенко А.С. ....	96
<b>АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ</b> Кортенко А.В., Усачева Т.В. ....	99
<b>РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХКОНТУРНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДПТ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ MECHVIEW</b> Борисов С.В., Родионов Г.В. ....	102
<b>ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВПИТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ С ВОДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДОЙ</b> Олиферович Н.М., Рыжова О.С., Якута Е.А. ....	105
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТАХ ПРИ СТЕКАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ С ЗЕЗЕМЛИТЕЛЕЙ</b> Ивонин В.В. ....	108
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПОВТОРНО- КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ</b> Дрозд А.С. ....	112

<b>РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО КАБЕЛЯ С ЗАДАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ</b> Потеряева Н.Л. ....	115
<b>РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДПТ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ MECHBIOS</b> Казakov Е.П. ....	118
<b>АНАЛИЗ СХЕМ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ С ПАРАЗИТИВНОЙ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА 555 ТАЙМЕРЕ</b> Чернышева А.Е., Кашкан М.А., Широков А.В. ....	122
<b>ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ИЗОЛЯЦИЮ ОБМОТОКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ</b> Болгова В.А. ....	124
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТОКА</b> Пашковский В.В., Федянин А.Л., Каранкевич А.Г. ....	127
<b>АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ</b> Мирзаянов Р.Р., Вавилов В.Е., Габдрахманова А. А. ....	130
<b>МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК</b> Кормилин Ю.А. ....	133
<b>РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КАБЕЛЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ</b> Насретдинова А.А., Анисимова О.А. ....	135
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ARDUINO ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ</b> Герашенко С.В., Сидорчик Д.Е. ....	138
<b>ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК УГЛОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ</b> Торопов А.В. ....	141
<b>РАЗРАБОТКА СИЛОВОГО КАБЕЛЯ СПЭ С НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ БАРЬЕРОМ</b> Догоновский В.Д. ....	144
<b>АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРОЛЕЙБУСОВ</b> Черепенников О.В., Муравлев О.П. ....	145
<b>ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКЕ ДОБАВОЧНОГО ТОКА КОММУТАЦИИ</b> Кулибаба М.В. Феоктистов К.А. ....	148
<b>РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КАБЕЛЯ ДЛЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА</b> Стасевская А.И., Анисимова О.А. ....	150

<b>К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ КАБЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЧЕСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА</b> Котов В.В., Щербакова Ю.М. ....	153
<b>ВЫБОР ТИПА И КОНСТРУКЦИИ ПОГРУЖНОГО ТРАНСФОРМАТОРА</b> Динь Конг Кюи .....	154
<b>ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ</b> Сидоров С.А. ....	157
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ КОНТУРА ТОКА СИСТЕМЫ ИРН-ДПТ В СРЕДЕ МЕХВИОС</b> Быковских П.В. ....	161
<b>РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ</b> Рогинская Л.Э., Сыроева М.В., Муразымов А.Ю. ....	165
<b>ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА НА РАЗВИТИЕ РАЗРЯДА В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ</b> Барсуков Д.А., Меркулов В.И. ....	168
<b>ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ОБМОТОК</b> Супуева А.С., Бекк П.А. ....	170
<b>СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛАССИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ELCUT</b> Асланян Р.О., Рапопорт О.Л. ....	174
<b>PLASMA DYNAMIC SYNTHESIS OF YTTRIUM-BARIUM CUPRATES FOR HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS</b> Stepanov K.I., Ivashutenko A.S. ....	179

---

**СЕКЦИЯ 2.  
ЭФФЕКТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

---

<b>ВЫЧИСЛЕНИЕ ДОЗ ФЛИКЕРА В МОДЕЛЯХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ</b> Ненахов А.И. ....	183
<b>ОЦЕНКА СТЕПЕНИ РИСКА ПРИ АВАРИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ПРИЧИНЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ</b> Бархатов А.Ф., Зайковская А.С. ....	185
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ЗА РУБЕЖОМ И В РОССИИ</b> Ковальчук С.С., Денисова М.А., Ковальковская Н.О. ....	189



<b>ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКАЯ СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ</b>	
Султанов В.В. ....	192
<b>КОМПЛЕКТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ</b>	
Асылханов А.Б., Ким Д.Э. ....	195
<b>РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВОГО ПОДХОДА К ТЕХНИЧЕСКОМУ ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ</b>	
Москалёв И.Л., Литвак В.В. ....	199
<b>АЭРОДИАГНОСТИКА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ</b>	
Лебедев Д.Е. ....	203
<b>ЭНЕРГЕТИКА БИОСФЕРЫ</b>	
Денисова М.А., Ковальчук С.С., Ковальковская Н.О. ....	205
<b>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ БИФУРКАЦИОННОГО АНАЛИЗА ЕГО ДИНАМИКИ</b>	
Русский В.А., Михальченко С.Г. ....	207
<b>АНТИРЕЗОНАНСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 кВ</b>	
Зарипов Р.Ф., Гусаков Д.В., Хафизов Р.Р. ....	211
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА И БАТАРЕИ СТАТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ</b>	
Суворов А.А. ....	214
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ГОРЕНИЕ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА</b>	
Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б. ....	217
<b>ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НЕГОРЮЧИХ КАБЕЛЕЙ</b>	
Лазарева Н.В. ....	221
<b>ОБ УЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ</b>	
Несветаило М.В. ....	223
<b>ВЫБОР УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ</b>	
Воронин К.А., Рахманова Ю.В. ....	225
<b>СРАВНЕНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЫСШИМИ ГАРМОНИКАМИ</b>	
Костинский С.С. ....	228

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ВЫБРОСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК</b>	
Делков А.В., Ходенков А.А., Замятина Э.В. ....	231
<b>ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В СИСТЕМАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ</b>	
Колесов П.Ю. ....	235
<b>РАЗРАБОТКА И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА НА БАЗЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА</b>	
Коломейцев А.А. ....	237
<b>РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ</b>	
Петрусёв А.С. ....	239
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ РАСХОДА ЖИДКОСТИ (РАСХОДОМЕРОВ)</b>	
Конев Н.С. ....	242

---

**КРУГЛЫЙ СТОЛ 3.  
СТРАТЕГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

---

<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ВЬЕТНАМА И СПОСОБНОСТЬ УДОВЛЕТВОРИТЬ ПОТРЕБНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ</b>	
Нгуен Ван Ву ....	246
<b>ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СЕТЯХ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМИ</b>	
Хафизов Р.Р., Гусаков Д.В., Зарипов Р.Ф. ....	249
<b>АВТОНОМНАЯ ТЕПЛОНАСОСНАЯ ВЫПАРНАЯ УСТАНОВКА</b>	
Гриценко И.В., Буртелов В.А. ....	251
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОВЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ</b>	
Усачёв И.В. Тепляков В.В. ....	254

---

**КРУГЛЫЙ СТОЛ 4.  
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

---

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМЫХ ВАКУУМНЫХ РАЗРЯДНИКОВ</b>	
Качесов В.Е., Петухов А.Е., Финашин Р.А. ....	259
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНЫХ ЛЭП</b>	
Адамчук А.В. ....	262
<b>К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ КАБЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЧЕСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА</b>	
Котов В.В., Щербакова Ю.М. ....	265
<b>ИЗМЕНЕНИЕ СООТНОШЕНИЙ СРЕДНЕЙ ЦЕНЫ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ И ЦЕНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ С 1986 ПО 2014 ГГ</b>	
Фролов А.А. ....	266

**Научное издание**

**ЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ**

**СБОРНИК ТРУДОВ ВТОРОЙ РОССИЙСКОЙ  
МОЛОДЕЖНОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ**

Подписано в печать 06.11.2014.

Формат 60x84/8.

Бумага «Svetocopy», «ColorCopy». Печать XEROX.

Усл.печ.л. 31,85. Уч. –изд.л. 13,19.

Заказ 2/06.11.14 – 04. Тираж 80 экз.

---

The logo for Scan, featuring the word "Scan" in a stylized, bold, black font on a yellow rectangular background. Above the "a" in "Scan", there is small text: "© 2014 scan.tom.ru".

ООО «СКАН», Студенческий центр, 634050, Томская область  
г. Томск, Ул. Советская,80, тел.: (3822) 56-17-26, e-mail:  
ntb@scan.tom.ru,  
сайт: scan.tom.ru.