

ISSN 0013-5860

# **Электротехника**

## **4 2011**



МЕДАЛЬ  
"ЗА ЗАСЛУГИ В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ –  
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ  
Издаётся с января 1930 года

#### УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)  
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)  
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)  
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)  
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)  
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)  
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)  
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)  
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

#### СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

МАКАРЕВИЧ Л.В. (председатель совета), МЕЩЕРЯКОВ В.М., ОРЛОВ Ю.А., КОВАЛЕВ Ф.И.,  
ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И. (заместитель председателя совета), ГЛОВАЦКИЙ А.В., ЧИБИРКИН В.В.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **РОЗАНОВ Ю.К.**, доктор техн. наук, проф.,  
БЕЛКИН Г.С., доктор техн. наук, БЕСПАЛОВ В.Я., доктор техн. наук, проф., БРЯНЦЕВ А.М.,  
доктор техн. наук, ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., канд. техн. наук, ДОЛКАРТ В.М., доктор техн. наук, ИНЬКОВ Ю.М.,  
доктор техн. наук, проф., КОЗЯРУК А.Е., доктор техн. наук, проф., КОПЫЛОВ И.П., доктор техн. наук, проф.,  
ЛАЗАРЕВ Г.Б., канд. техн. наук, ЛУРЬЕ А.И., канд. техн. наук, МОСКАЛЕНКО В.В., канд. техн. наук, проф.,  
НИКУЛИН А.А., канд. техн. наук, ПАНИБРАТЕЦ А.Н., канд. техн. наук, СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В., доктор  
техн. наук, проф. (зам. главного редактора), ТУБИС Я.Б., канд. техн. наук

Полная версия журнала в формате PDF размещена на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru).

Содержание журнала можно бесплатно получить в INTERNET через службу ИНФОМАГ, организованную в Московском физико-техническом институте.  
Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Журнал переводится на английский язык в полном объёме и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" (18 West 27th Street New York N.Y. 10001).

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи по объединённому каталогу Департамента почтовой связи. Подписной индекс — 71111.

В редакции можно подписаться на журнал с любого месяца и приобрести отдельные номера.

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт.

Рукописи статей не возвращаются.

**Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.**  
**Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (495) 361-95-96**  
**E-mail [elektrotehnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotehnika@mtu-net.ru)**

Редактор отдела О.В. Кунавина  
Научный редактор Л.А. Романова  
Редактор З.П. Фёдорова  
Компьютерная верстка Н.Н. Мерзляков

Сдано в набор 11.02.2010 Выход в свет 20.04.2011 Формат 60х88 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 42

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный 01330.

Отпечатано в ООО «Галлея-Принт»  
Москва, 5-я Кабельная ул., 26

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

- Пак В.М., Панков А.В., Куимов И.Е.** Современное состояние и перспективы развития систем изоляции крупных электрических машин . . . . . 2
- Андреев А.М., Азизов А.Ш., Безбородов А.А., Папков А.В., Пак В.М.** Исследование возможности создания высокотеплопроводной системы электрической изоляции для турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением . . . . . 7
- Андреев И.А., Амосов В.В., Ляховский Ю.З.** Оценка состояния системы изоляции статорной обмотки, высоковольтных электрических машин по результатам измерения статических характеристик частичных разрядов . . . . . 12
- Папков А.В., Березинец Н.И., Киреев А.В., Пак В.М.** Ресурсные испытания систем изоляции класса нагревостойкости Н (180°C) тяговых двигателей локомотивов . . . . . 17
- Березинец Н.И., Папков А.В., Мельниченко А.П., Киреев А.В., Пак В.М.** Основные результаты тестирования системы изоляции класса нагревостойкости 220°C на основе материалов производства ОАО «ХК Элинар» . . . . . 20
- Пак В.М., Сафонов Г.П., Папков А.В., Воробьев П.В.** Перспективные изоляционные материалы для систем изоляции электрических машин . . . . . 23
- Мельниченко А.П., Папков А.В., Пак В.М.** Разработка пазовой изоляции роторов турбогенераторов с повышенными электрофизическими и механическими характеристиками. . . . . 27

### ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

- Годулян В.В., Милкин Е.А., Трифонов В.З.** Совершенствование методики проведения испытаний изоляторов в условиях загрязнения и увлажнения . . . . . 29
- Родионов Н.Н.** Анализ состояния поверхности электроизоляционных конструкций при воздействии осадков . . . . . 34

### СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Мясичев С.В., Московец Н.В., Шипаева С.Н.** Комплекс управления групповым электроприводом . . . . . 37
- Бардин В.М., Борисов Д.А.** Переходные процессы в сварочном инверторе переменного тока . . . . . 42
- Зотов Л.Г.** Конденсаторные повышающие преобразователи постоянного напряжения с изменяющейся структурой для автономных энергосистем . . . . . 46
- Герман-Галкин С.Г., Гаврилов С.В.** Исследование активного полупроводникового преобразователя в среде Matlab-Simulink . . . . . 51

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

- Мустафаев Р.И., Саидов Р.А.** Исследование асинхронных двигателей насосов водяных скважин . . . . . 57

### ХРОНИКА

- Международная номинация в электротехнике . . . . . 62

### НАШИ ЮБИЛЯРЫ

- Исаак Яковлевич Браславский** . . . . . 63
- Вячеслав Григорьевич Огоньков** . . . . . 64

## CONTENTS

### ELECTRIC INSULATION TECHNIQUE

- V.M. Pak, A.V. Papkov, I.E. Kuimov.** Present situation and perspective of development insulating systems large electrical machines . . . . . 2
- A.M.Andreev, A.Sh.Azizov, A.A.Bezborodov, A.V.Papkov, V.M.Pak.** Investigation of possibility of creation increased high thermal conductivity insulation system for turbogenerators with air and hydrogen cooling . . . . . 7
- I.A.Andreev, V.V.Amosov, Yu.Z.Lyahovsky.** Estimation of stator winding insulation for high-voltage electrical machines according to test results of statistical parameters of partial discharges . . . . . 12
- A.V.Papkov, N.I.Berezinets, A.V.Kireev, V.M.Pak.** Resource tests insulating systems H class traction motors . . . . . 17
- N.I.Berezinets, A.V.Papkov, A.P.Melnichenko, A.V.Kireev, V.M.Pak.** The main test results of 220°C class insulation systems based on materials manufactured by JSC «Elinar holding company» . . . . . 20
- V.M.Pak, G.P.Safonov, A.V.Papkov, P.V.Vorobyev.** New insulating materials for electrical machine's insulation systems . . . . . 23
- A.P. Melnichenko, A.V. Papkov, V.M. Pak.** Developing of slot insulation of rotors turbogenerators with high electrical & mechanical characteristics . . . . . 27

### HIGH-VOLTAGE ENGINEERING

- V.V. Godulyan, E.A. Milkin, V.Z. Trifonov.** Improving of the methodology of conducting tests in the pollution conditions. . . . . 29
- N.N.Rodionov.** Analysis of the condition of the surface electricalinsulating constructions at influence precipitations. . . . . 34

### POWER ELECTRONICS AND CONVERTER TECHNIQUE

- V.I.Kuz'kin, V.N.Meleshkin, S.V.Myasishev, N.V.Moskovets, S.N.Shipaeva.** Group electric drive control complex . . . . . 37
- V.M.Bardin, D.A.Borisov.** Transient processes in an alternative-current welding inverter . . . . . 42
- L.G.Zotov.** Capacitor step-up DC converters with varying structure for autonomous power . . . . . 46
- S.G.German-Galkin, S.V.Gavrikov.** Investigation of the active semiconductor converter in the environment Matlab-Simulink . . . . . 51

### ELECTRICAL MACHINES

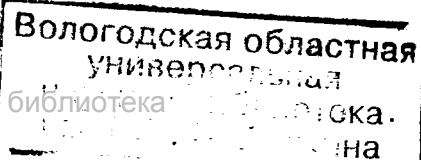
- R.I. Mustafayev, R.A. Saidov.** Study of water holes pumps asynchronous motors. . . . . 57

### CHRONICLE

- International nomination of electrical engineering . . . . . 62

### OUR JUBILEERS

- Isaak Yakovlevich Braslavskii.** . . . . . 63
- Vyacheslav Grigor'evich Ogon'kov** . . . . . 64



## Современное состояние и перспективы развития систем изоляции крупных электрических машин

ПАК В.М., ПАПКОВ А.В., КУИМОВ И.Е.

*Дано краткое описание современных систем изоляции турбо- и гидрогенераторов на основе электроизоляционных материалов (ЭИМ), выпускаемых ОАО «ХК Элинар». Приведены технические характеристики применяемых ЭИМ и результаты испытаний систем изоляции.*

**Ключевые слова:** электроизоляционные материалы, системы изоляции, турбогенераторы, гидрогенераторы, крупные электрические машины.

На всех этапах развития производства крупных электрических машин, генерирующих электроэнергию, одной из самых сложных задач была и остаётся разработка надёжной системы изоляции статорной обмотки, которая вносит существенный вклад в обеспечение безотказной работы электрической машины. Современное развитие конструкций турбо- и гидрогенераторов идёт по пути увеличения их единичной мощности. В связи с этим повышаются требования к существующим электроизоляционным материалам и более чётко выявляются недостатки ранее применявшихся материалов и систем изоляции.

Проводниковые и магнитопроводящие материалы для электрических машин на протяжении нескольких десятилетий не претерпели заметных изменений. Поэтому весь прогресс в энергетическом электромашиностроении в последнее время достигнут в основном за счёт усовершенствования высоковольтных изоляционных систем и технологий их переработки, что позволило существенно повысить эксплуатационные параметры статорной изоляции высоковольтных электрических машин. Снизилась толщина изоляции и, соответственно, улучшились её теплопередающие свойства, повысилась средняя напряжённость электрического поля, достигнув значений 2,8–3,0 кВ/мм [1].

Электроизоляционные материалы в значительной степени определяют эксплуатационные и технические характеристики, долговечность и надёжность электрических машин. Повышение физико-механических свойств изоляции позволяет увеличить удельные элек-

*In the article short description of the up-to-date insulation system of turbo and hydro generators on the base of electrical insulating materials (EIM) manufactured by "Elinar Holding Company". Technical characteristics of EIM and test results insulation systems are described.*

**Key words:** electrical insulating materials, insulation systems, turbo generators, hydro generators, large electrical machines.

трические, механические и тепловые характеристики конечного изделия, что приводит к сокращению расхода электротехнической стали, чёрных и цветных металлов, меди на единицу мощности электрической машины. За счёт снижения толщины изоляции на 15–20% мощность электрических машин может быть повышена в тех же габаритах на 4–10%, что соответствует снижению расхода чёрных и цветных металлов на 3–8%. Повышение допустимой температуры электрической обмотки на 20 °С позволяет увеличить мощность электрической машины на 13–15% и на 10–12% снизить их материалоемкость. От качества электроизоляционных материалов также во многом зависит степень механизации и автоматизации обмоточно-изолирующих работ, длительность технологического цикла изготовления изоляции.

К изоляции обмоток статоров предъявляется целый ряд принципиально важных требований, от степени удовлетворения которых зависит технический уровень турбо- и гидрогенераторов, их конкурентоспособность на рынке, а также надёжность и долговечность в эксплуатации. Изоляция должна обеспечить:

- высокую электрическую прочность, длительную и кратковременную;
- минимальные потери от токов утечек;
- максимальную монолитность, чтобы исключить воздушные включения во избежание появления разрядов;
- высокую адгезию с изоляцией обмоточного провода, чтобы исключить разряды на стыке медных проводников и корпусной изоляции;

- высокие физико-механические свойства;
- высокую термостойкость (применительно к современным турбо- и гидрогенераторам требуется класс нагревостойкости изоляции F, т.е. обмотка статора должна допускать длительную работу при температуре 155 °C);
- высокую теплопроводность, чтобы сделать минимальным тепловой барьер между медью и сердечником статора.

Основные требования к изоляции высоковольтных электрических машин составлены на основе стандартов МЭК, рекомендаций американского Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE), внутренних стандартов крупнейших энергомашиностроительных компаний России.

#### Основные требования к изоляции крупных электрических машин

Кратковременная электрическая прочность, МВ/м . . . . .	25–30
Длительная электрическая прочность (среднее время до пробоя изоляции при $E=15\text{МВ/м}$ ), ч. . . . .	80
Длительная электрическая прочность при воздействии электрического поля 9–10 МВ/м и температуры 100–120 °C (IEEE Std 1043–1989), ч. . . . .	400
$\text{tg}\delta$ , % при:	
– температуре 15–35 °C . . . . .	$\leq 1$
– температуре 155 °C . . . . .	8–10
Приращение $\text{tg}\delta$ ( $\text{tg}\delta_{0,6U_H} - \text{tg}\delta_{0,2U_H}$ ), % . . . . .	$< 0,5$
Модуль упругости, МПа, при:	
– температуре 15–35 °C . . . . .	200
– температуре 155 °C . . . . .	190
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, при:	
– температуре 15–35 °C . . . . .	80–100
– температуре 155 °C . . . . .	60–70
Разрушающее напряжение при статическом изгибе, МПа . . . . .	140–170
Разрушающее напряжение при статическом сжатии, МПа . . . . .	320–380
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК . . . . .	0,25–0,50
Устойчивость к воздействию тепловых циклов при многократном изменении температуры от 40 до 155 °C . . . . .	*
Коэффициент линейного теплового расширения, 1/град . . . . .	$(0,8–1,0) \cdot 10^6$
Класс нагревостойкости по ГОСТ 10518-88 . . . . .	F

\* Кол-во циклов и оценочные показатели по согласованию с заказчиком.

В современном энергетическом электромашиностроении преимущественно применяются две технологии изготовления изоляции высоковольтных электрических машин (табл. 1). Технология изготовления изоляции термо-

прессованием получила наименование Resin Rich (RR), а технология изготовления изоляции вакуум-нагнетательной пропиткой – Vacuum pressure impregnation (VPI).

Для корпусной изоляции статорных обмоток электрических машин применяются два типа слюдяных лент – предварительно пропитанные и непропитанные. У предварительно пропитанных лент содержание связующего вещества составляет от 33 до 42% мас. У непропитанных лент содержание связующего вещества составляет от 4 до 12% мас., а основная часть связующего вводится в процессе вакуум-нагнетательной пропитки.

Основные показатели предварительно пропитанных слюдяных лент регламентируются требованиями МЭК 371-3-4 и МЭК 371-3-6 [2], непропитанных лент – МЭК 371-3-5 [3].

В табл. 2 и 3 приведены основные характеристики предварительно пропитанных и непропитанных слюдяных лент, которые наиболее широко используются ведущими мировыми производителями турбо- и гидрогенераторов.

ОАО «Холдинговая компания Элинар» относится к числу крупнейших российских производителей слюдяных лент для высоковольтной изоляции. Более 50-ти лет компания выпускает предварительно пропитанные и непропитанные ленты для всех существующих способов изготовления высоковольтной изоляции. В настоящее время большая часть изоляции обмоток турбо-, гидрогенераторов и высоковольтных электрических машин на электромашиностроительных предприятиях Российской Федерации и стран СНГ изготавливается на изоляционных лентах производства «Холдинговой компании Элинар».

В табл. 4 и 5 приведены перечни турбо-, гидрогенераторов, выпущенных в последние годы филиалом «Электросила» ОАО «Силовые машины», обмотки статоров которых изготовлены на лентах Элмикатерм® производства ХК «Элинар».

В настоящее время большинство заказчиков турбо- и гидрогенераторов ставят задачу оценки надёжности электрической машины на стадии изготовления. Как правило, требуется проведение таких испытаний на реальных стержнях. Задача ускоренных функциональных испытаний состоит в оценке долговечности и степени износа изоляции как при раздельном, так и при совместном воздействии электрического поля, температуры (электротеплового старения) и термоциклов (нагрева и охлаждения обмотки).

Таблица 1

## Технологии изготовления изоляции турбо- и гидрогенераторов

Технология	Слюдяные ленты	Способ изготовления	Преимущества	Недостатки
Resin Rich (ВЭС-2, слюдотерм, элмикатерм, изотенакс, майкапэл)	Предварительно пропитанные	Термогидропрессовка в битумном автоклаве в пресспланках Термопрессовка в прессформах	Высокая производительность, универсальная оснастка Высокая точность геометрических размеров	Необходимость калибровки готовых стержней Низкая производительность
VPI: Single Bar (монолит, микадур, микаластик, термолластик)	Непропитанные	Вакуум-нагнетательная пропитка компаундом и запечка изоляции отдельных стержней	Высокие диэлектрические и физико-механические свойства из-за горячей опрессовки до пропитки и запечки изоляции под непрерывным давлением. Возможность испытать стержни до укладки в пазы статора. Герметичное скрепление элементов готового статора. Высокая производительность по сравнению с монолитом.	Низкая производительность по сравнению с монолитом-2 Трудности при извлечении обмоток после пропитки и запечки
Global (монолит-2, микадур - компакт)		Вакуум-нагнетательная пропитка и запечка изоляции статоров, после укладки стержней в статор		

Таблица 2

## Сравнительные характеристики предварительно пропитанных слюдяных лент класса нагревостойкости F

Показатель	Самикатерм 366.28 («Вон Ролл»)	Relanex 45.031 («Кожеби»)	Кальмикаглас 2005 («Извольта»)	Элмикатерм 55409, 52409 («Элинар»)
Толщина, мм	0,18±0,03	0,18±0,03	0,18±0,02	0,18±0,02
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	265±26	255±25	258±23	247±22
Слюдяная бумага (мусковит), г/м <sup>2</sup> (%)	120±7 (45)	120±10 (47)	120±5 (46)	120±8 (48)
Стеклоткань, г/м <sup>2</sup>	32±3	34±4	33±3	38±4
Содержание связующего, г/м <sup>2</sup> (%)	113±20 (42)	102±15 (40)	105±15 (40)	89±10 (36)
Разрушающее напряжение на разрыв, Н/см	>150	>140	>150	>140
Текучесть, %	>45	55–65	>45	45–70
tgδ при 155 °С	0,085–0,13	<0,1	<0,1	<0,1

Таблица 3

## Сравнительные характеристики непропитанных слюдяных лент класса нагревостойкости F

Показатель	Поробанд ME 2072 («Извольта»)	Самикапор 366.58 («Вон Ролл Изола»)	609ASR 16-24 («Кожеби»)	Элмикапор 53319 («Элинар»)
Толщина, мм	0,16±0,03	0,15±0,02	0,15±0,02	0,15±0,02
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	196±15	192±15	198±13	194±15
Слюдяная бумага (мусковит), г/м <sup>2</sup> (%)	160±19 (79)	160±10 (80)	160±10 (80)	160±15 (82)
Стеклоткань, г/м <sup>2</sup>	24±2	23±2	24±3	34±3
Содержание связующего, г/м <sup>2</sup> (%)	13±3 (5)	9±4 (5)	11±3 (5,5)	7±3 (3,6)
Разрушающее напряжение на разрыв, Н/см	>140	>80	>80	>80
Пористость по Герлею, с/100 мл	<1000	<800	<500	<1000

Таблица 4

**Перечень турбогенераторов, изоляция обмоток статоров которых изготовлена на лентах Элмикатерм®**

Тип т/г	Страна, станции	Кол-во, т/год	Мощность, МВт	Номинальное напряжение, кВ
ТВВ-1000-2УЗ	Китай, АЭС Тянь-Вань	2	1000	24
ТВВ-1000-2	Индия, АЭС Кудам-Кулан	2	1000	24
ТВВ-1000-4УЗ	Украина, Запорожская АЭС	1	1000	24
ТВВ-1000-2УЗ	Россия, Калининская АЭС	1	1000	24
ТВВ-500-3УЗ	Россия, Смоленская АЭС	1	500	20
ТВВ-35-2УЗ	Россия, Башкирэнерго Кормоновская ГРЭС	1	350	20
ТФП-40-2	Казахстан	1	40	10,5
ТФП-40-2	Казахстан	1	40	10,5
ТВВ-500-2	Россия, Концерн «Росэнергоатом»	1	500	20
ТВВ-165-2УЗ	Россия, Красноярская ТЭЦ	1	165	18
ТВВ-800	Россия, Пермская ГРЭС	1	800	25
ТЗВ-63-2УЗ	Казахстан	1	63	10,5
ТВВ-320-2УЗ	Россия, Конаковская ГРЭС	1	320	20

Таблица 5

**Перечень гидрогенераторов, изоляция обмоток статоров которых изготовлена на лентах Элмикатерм®**

ГЭС	Страна	Тип	Кол-во, г/год	Мощность, МВт	Номинальное напряжение, кВ
Бурейская	Россия	СВ 1313/265-48	6	335	15,75
Красноярская	Россия	СВФ 1690/185-64	1	500	15,75
Капанда	Ангола	СВ 904/235-36	1	130	13,8
Ялхама	Финляндия	СВ 615/140-52	1	21,8	10,5
Аиттокоски	Финляндия	СВ 650/250-42	1	46,8	10,5
Крангедде	Швеция	СВ 650/180-36	1	41,4	9,25
Тхак-Ба	Вьетнам	СВ1 845140-44	1	40	10,5
Эмма	Финляндия	СВ 650120-48	1	54	12,4
Грюндфорс	Швеция	СВ 750185-40	1	54	12,4
Усть-Среднеканская	Россия	СВ1 260153-60	1	142,5	15,75
Торул	Турция	СВ 456135-14	2	51,6	13,8
Асуан (замена генераторов)	Египет	СВ-1260/235-60Т4	2	200	15,75
Эль-Кахон	Мексика	СВ-1182/300-48ТВ4	2	375	17,0
Джердап-1	Югославия	СВ-1488/175-84УхЛ4	6	185	15,75

Многолетний опыт оценки надёжности изоляции показал, что вибрационное и тепловое старение в большинстве случаев не являются доминирующими факторами в эксплуатационном износе и могут не воспроизводиться при комплексных испытаниях. Поэтому в качестве факторов старения, действующих на изоляцию в процессе функциональных испытаний, должны быть выбраны термомеханические напряжения и электрическое поле. Ин-

тенсификация термомеханического старения изоляции достигается путём существенного ускорения нагрева и охлаждения испытуемой обмотки по сравнению с рабочим режимом.

За последние годы специалистами «Холдинговой компании Элинар» совместно со специалистами ведущих электромашиностроительных компаний был выполнен комплекс работ по оценке устойчивости изоляции к воздействию электротеплового старения, а

также факторов, возникающих при пусках генераторов с набором номинальной нагрузки и при мгновенных отключениях от номинальной нагрузки. Исследования проводились на натурных стержнях, изготовленных по технологии RR. Испытаниям подвергались варианты изоляции, изготовленные с применением слюдосодержащих лент Элмикатерм с различным содержанием слюдяного барьера и химическим составом связующего вещества.

Одной из целей испытаний являлась проверка устойчивости изоляции к термоциклам – многократным изменениям температуры меди от 40 до 155 °С. Максимальная температура 155 °С определялась классом нагревостойкости изоляции F.

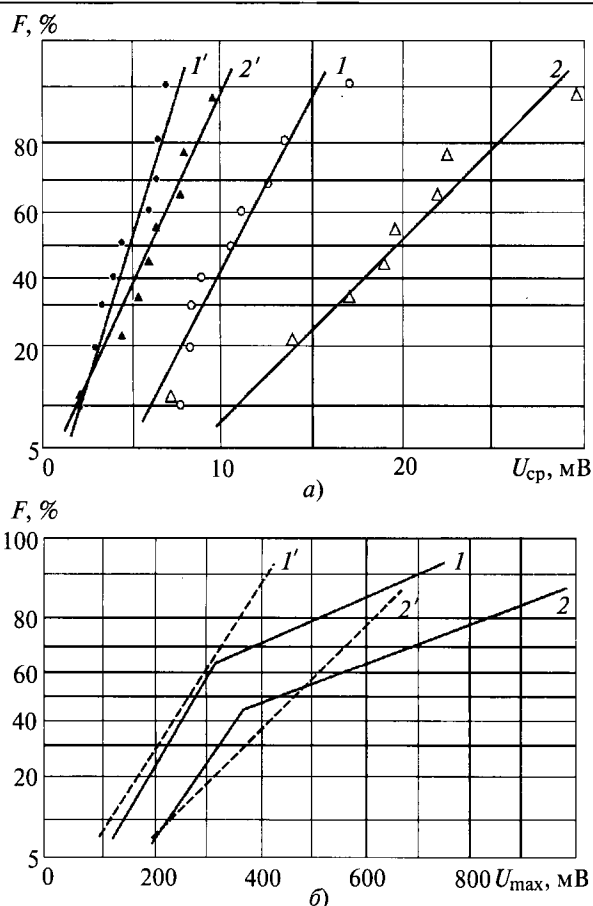
Методика термоциклических испытаний была близка к принятой в стандарте США IEEE Std 1310-1996 «IEEE Trial use recommended practice for thermal cycle testing of Form – Wound Stator Bars and Coils for Large Generators». Для обеспечения необходимой скорости нагрева элементарные проводники в плетёной меди были соединены последовательно. Проводники нагревались током 75–100 А со скоростью 6–8 °С/мин до установленной температуры 155 °С, по достижении которой ток отключался и происходило охлаждение при обдуве их вентилятором до 40 °С. Температура контролировалась термопарами, установленными на проводниках у края образца. Схема нагрева состояла из трёх параллельных цепей, в каждую из которых включалось последовательно по три образца, представлявших различные варианты изоляции.

Контроль монолитности производился акустическим методом (простукиванием) в исходном состоянии и через каждые 50 циклов.

Изменение звука при акустическом контроле было обнаружено у образцов варианта Элмикатерм 1 после 300 термоциклов, а у варианта Элмикатерм 2 уже после 50 циклов. В соответствии с программой термоциклы были прекращены и проведены измерения ЧР, а затем определена электрическая прочность.

На рисунке приведены функции распределения среднего и максимального напряжений импульсов ЧР, измеренных при испытательных напряжениях 20 и 10 кВ для всех вариантов изоляции. Как видно, наибольший уровень ЧР, указывающий на наличие газовых полостей в изоляции, имели образцы Элмикатерм 2, а наилучшие показатели монолитности у образцов Элмикатерм 1.

Пробивные напряжения образцов до и после действия термоциклов приведены в табл. 6 из которой видно, что образцы изоляции Эл-



Функция распределения среднего (а) и максимального (б) напряжений импульсов ЧР после воздействия термоциклов при испытательных напряжениях: 10 (1' и 2') и 20 кВ (1 и 2) на изоляцию Элмикатерм 1 (1 и 1') и Элмикатерм 2 (2 и 2')

микатерм 2 имели наименьшую электрическую прочность как в исходном состоянии, так и после действия термоциклов, а изоляция Элмикатерм 1 обладает значительно более высокой стойкостью к термоциклам, которая оценивалась по уровню ЧР и значениям электрической прочности.

Таблица 6

Среднее пробивное напряжение, кВ, образцов при подъёме испытательного напряжения ступенями 5 кВ/мин

Вариант изоляции	Испытание перед термоциклами	Испытание после термоциклов
Элмикатерм 1	90	87
Элмикатерм 2	70	67,5

### Выводы

1. Применение лент с повышенной поверхностной плотностью слюдяных бумаг обеспечивает высокие значения длительной электрической прочности изоляции и позволяет повысить напряжённость поля на обмотке до 3–3,2 МВ/м.



2. Применение лент с меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь при рабочих температурах (ниже 10% при 155 °С) обеспечивает устойчивость изоляции к одно-временному воздействию высоких напряжённостей поля (10 МВ/м) и температур (до 130 °С) в течение 400 ч.

3. Применение лент с более высоким классом нагревостойкости повышает устойчивость изоляции при воздействии тепловых циклов.

4. На ближайшие годы можно прогнозировать развитие термореактивной изоляции крупных электрических машин с применением слюдяных лент с повышенным содержанием слюдяного барьера, термостойких пропиточных составов, высокопористой слюдяной бумаги, а также повышение качественного уровня технологических процессов изготовления изоляции.

5. Высокие электрофизические и физикомеханические свойства изоляции на основе слюдосодержащих лент Элмикатерм® доказаны её широким применением при выпуске и ремонте крупных электрических машин. Опыт применения лент на отечественных и зарубежных энергомашиностроительных предприятиях показывает, что усовершенствованная термореактивная изоляция Элмикатерм® по своим

свойствам не уступает лучшим мировым аналогам.

### Список литературы

1. Bock A. et al. Trends in Insulation Systems for Generator HV-Windings// SIGRE. 2002. 11–102.
2. Specifications for individual materials. Sheet: Glass-backed mica paper with a B-stade epoxy resin binder // IEC 371-3-6. Past 3. 1992.
3. Specifications for individual materials. Sheet: Glass - backed mica paper with an epoxy resin binder for post impregnation (VPI) // IEC 371-3-5. Past 3. 1992.

**Пак Владимир Моисеевич** — работал главным специалистом по электроизоляционным материалам в ОАО «Холдинговая компания Элинар», доктор техн.наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Усовершенствование изоляции крупных электрических машин» в 2000 г.

**Папков Андрей Владимирович** — заместитель генерального директора по техническому развитию ОАО «Холдинговая компания Элинар», канд. техн. наук. Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г. Защитил диссертацию в МИТХТ по специальности «Химическая технология основного органического синтеза» в 1991 г.

**Куимов Игорь Евгеньевич** — генеральный директор ОАО «Холдинговая компания Элинар», канд. техн. наук, доктор электротехники. Окончил Санкт-Петербургский политехнический университет в 1975 г. Защитил диссертацию по специальности «Электроизоляционные материалы» в 1999 г.

## Исследование возможности создания высокотеплопроводной системы электрической изоляции для турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением

АНДРЕЕВ А.М., АЗИЗОВ А.Ш., БЕЗБОРОДОВ А.А., ПАПКОВ А.В., **ПАК В.М.**

Представлены результаты сравнительных испытаний основных электрофизических свойств нового типа высокотеплопроводной изоляции для турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением и традиционно применяемой. Показано, что введение в состав изоляционного материала модифицированного лака с высоким коэффициентом теплопроводности не вызывает значительного ухудшения его электрических свойств.

**Ключевые слова:** электрическая изоляция, эпоксидная смола, слюдяная лента, электрическая прочность, диэлектрические потери, теплопроводность, технология.

В мировой электроэнергетике в последние десятилетия наблюдается увеличение производства мощных турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением. Рост мощно-

*In this article results of comparative tests of the basic electro-physical properties of a new type of the insulation for turbo generators with air and hydrogen cooling in comparison with traditional one are presented. It is shown, that adding a modifier in to the structure of the insulation material having high thermal conductivity does not cause significant decreasing of its electric properties.*

**Key words:** electrical insulation, epoxy resin, mica tape, dielectric breakdown, dissipation factor, thermal conductivity, technology.

сти турбогенераторов в основном ограничивается предельно допустимым током обмоток статора. При этом тепло, генерируемое в проводниках, передаётся через стенки корпусной

изоляции, являющейся тепловым барьером. Компоненты корпусной изоляции: слюдяная бумага, связующее и подложки, обладая отличными электроизоляционными свойствами, имеют относительно низкую удельную теплопроводность. Значения коэффициента теплопроводности современной слюдосодержащей изоляции лежат в интервале от 0,25 до 0,30 Вт/(м·К), тогда как соответствующие значения для меди и стали превышают их в 1500 и 300 раз соответственно. В результате слюдосодержащая изоляция действует как тепловой барьер, ограничивая эффективность системы охлаждения и, как следствие, допустимую удельную мощность электрической машины.

Необходимость создания мощных турбогенераторов потребовала разработки систем изоляции с улучшенными теплопередающими свойствами. Существует несколько основных способов улучшения теплопередачи в системе статорной обмотки:

- уменьшение толщины корпусной изоляции;
- увеличение допустимой рабочей температуры корпусной изоляции;
- повышение коэффициента теплопроводности корпусной изоляции.

Первый способ требует существенного увеличения достигнутого уровня длительной электрической прочности корпусной изоляции, что в обозримом будущем практически невозможно из-за оптимального (с точки зрения содержания слюды) состава используемых современных слюдопластовых лент. Дальнейшее повышение рабочей напряжённости и связанное с этим утончение изоляции может привести наряду с проблемами электрического старения, к существенному снижению механических характеристик корпусной изоляции и усложнению проблемы нанесения противокоррозионного покрытия, что неизбежно негативно скажется при монтаже обмотки.

Для реализации второго способа повышения теплопередачи необходимо применение изоляционных материалов с более высоким классом нагревостойкости, чем класс F, что сопровождается определёнными сложностями в настоящее время.

Путь, связанный с применением корпусной изоляции, обладающей повышенной теплопроводностью, по сравнению с традиционно применяемыми в настоящее время типами изоляции, наиболее реалистичен [1–3].

По данным корпорации «Toshiba» (Япония) при создании турбогенератора мощностью 670 МВ·А с водородным охлаждением была приме-

нена корпусная изоляция с теплопроводностью, в два раза превышающей теплопроводность стандартной изоляции [4].

В настоящее время в мировой практике реализуются три основных направления повышения теплопроводности слюдосодержащей изоляции:

- оптимизация состава существующих изоляционных лент;
- создание наполненных изоляционных лент;
- разработка модифицированного высокотеплопроводного связующего.

Основная цель оптимизации состава слюдопластовых изоляционных лент — создание композиции с максимальным относительным содержанием компонентов с наибольшим значением коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и соответственно с минимальным содержанием компонентов с наименьшим значением  $\lambda$ . При этом технологические и электрические свойства ленты не должны ухудшаться. Поскольку минимальным значением  $\lambda$  в составе изоляционной ленты обладает эпоксидный компаунд, то соответственно снижение его содержания приведёт к повышению  $\lambda$  всей композиции и также должно привести к улучшению электрических характеристик корпусной изоляции. Для снижения содержания эпоксидного компаунда в изоляционных лентах обычно используется новый тип более тонкой стеклоткани [5]. Однако этот путь не даёт существенного повышения теплопроводности изоляции. Расчёты [6] показали, что в этом случае  $\lambda \leq 0,45$  Вт/(м·К), более поздние экспериментальные работы [2] подтвердили этот факт.

Концепция создания высокотеплопроводной наполненной корпусной изоляции заключается в применении мелкодисперсных диэлектрических наполнителей с высоким значением теплопроводности [3, 7]. Такой путь был выбран, главным образом, при создании непропитанных («сухих») слюдосодержащих лент, предназначенных для технологии вакуум-нагнетательной пропитки. Применение диэлектрических наполнителей микронных размеров приводит к росту теплопроводности наполненной ленты по сравнению с ненаполненной в несколько раз. Однако наряду с увеличением  $\lambda$  отмечаются технологические сложности при изготовлении изоляции, связанные с недостаточно высокой скоростью пропитки изоляции, выполненной из наполненных лент. Почти в два раза увеличивается продолжительность вакуум-нагнетательной пропитки [8], при этом вязкость компаунда должна быть

низкой. Следовательно, для пропитки корпусной изоляции из наполненных лент с повышенной теплопроводностью требуется особый тип компаунда с пониженной вязкостью. Таким образом, наполненные непропитанные ленты характеризуются недостаточно высокой пропиточной способностью, что может привести к ухудшению качества процесса вакуум-нагнетательной пропитки и в итоге к существенному снижению коэффициента теплопроводности всей системы изоляции, а также электрической прочности корпусной изоляции.

Общеизвестно, что наименьшим значением теплопроводности в системе корпусной изоляции обладают изоляционные пропитывающие компаунды, у которых  $\lambda \leq 0,17 \div 0,21$  Вт/(м·К). Это относится как к пропитывающим компаундам для вакуум-нагнетательной пропитки, так и к пропитывающим лакам, применяющимся при изготовлении предварительно пропитанных слюдосодержащих лент. Поэтому для повышения теплопроводности корпусной изоляции необходимо в первую очередь увеличивать коэффициент теплопроводности пропитывающих компаундов. По этому направлению ведутся работы в фирме «Hitachi» (Япония) по созданию изоляционного пропитывающего компаунда с рекордно высокими значениями коэффициента теплопроводности [9,10]. Компаунд создан методами нанотехнологии из смеси мономеров 4,4'-дифенил-диглицидил-эфира и 3,3',5,5' тетраметил-4,4'дифенил-диглицидил-эфира. В результате синтеза формируется ориентированная молекулярная структура, обладающая объёмными образованиями («мезогруппами»), наиболее благоприятными для распространения теплового потока, в результате чего  $\lambda$  увеличивается в 4–5 раз по сравнению с обычным эпоксидным компаундом.

Другим способом повышения теплопроводности пропитывающих компаундов является добавление в состав мелкодисперсных диэлектрических наполнителей, характеризующихся высокой теплопроводностью. Однако, как ранее отмечалось, введение в пропитывающие компаунды порошковых добавок микронных размеров приводит к определённым проблемам, главным образом, технологического характера. Это, в свою очередь, приводит к практической невозможности создания наполненных пропитывающих лаков, предназначенных для производства предварительно пропитанных слюдосодержащих лент.

В ряде исследований [11] для повышения теплопроводности различных полимерных материалов кроме добавок микронных размеров используют наномодифицирующие добавки (углеродные нанотрубки, нано- $Al_2O_3$ , нано- $SiO_2$  и др.). Модификация наноразмерными добавками приводит к формированию особой надмолекулярной структуры полимеров, которая изменяет физико-химические и диэлектрические свойства. В частности, происходит увеличение теплопроводности, стойкости к воздействию поверхностных частичных разрядов, триингустойкости. Тем не менее, вопрос влияния наноразмерных частиц на свойства электрической изоляции до настоящего времени не полностью изучен и требует дальнейших исследований.

В работе исследовались три типа предварительно пропитанных слюдосодержащих лент производства ОАО «ХК Элинар»:

- стандартная лента (Элмикатерм 52409);
- лента с оптимизированным с точки зрения теплопроводности композиционным составом (опытная лента № 1);
- лента с модифицированным высокотеплопроводным пропитывающим составом (опытная лента № 2).

Структурный состав исследованных лент приведён в табл. 1.

Таблица 1

Тип ленты	Толщина, мм	Содержание компонентов, %		
		Слюда	Связующее	Летучие
Стандартная	0,14	40	37	<1,5
Опытный образец № 1	0,11	45	31	<1,5
Опытный образец № 2	0,18	49	39	<1,5

Измерение коэффициента теплопроводности образцов изоляции, изготовленных из исследованных лент, проводилось методом динамического калориметра с использованием прибора ИТ- $\lambda$ -400 в интервале температур от 25 до 150 °С. Образцы изоляции для определения коэффициента теплопроводности изготавливались толщиной 0,8–2,0 мм диаметром  $15 \pm 0,3$  мм из корпусной изоляции стержней, произведённой промышленным способом.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента теплопроводности от температуры образцов изоляции, изготовленных из исследованных предварительно пропитанных лент. Для всех исследованных вариантов наблюдает-

Таблица 2

$T, ^\circ\text{C}$	20				130				155			
$U_{\text{исп}}, \text{кВ}$	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
Элмикатерм 52409												
$\text{tg}\delta, \%$	0,40	0,42	0,54	0,61	2,46	2,46	2,47	2,51	6,20	6,20	6,25	6,31
Опытная лента № 1												
$\text{tg}\delta, \%$	0,51	0,53	0,62	0,65	1,56	1,55	1,54	1,54	5,51	5,63	5,79	5,99
Опытная лента № 2												
$\text{tg}\delta, \%$	0,52	0,52	0,54	0,57	1,90	1,91	1,92	1,96	5,40	5,41	5,44	5,53

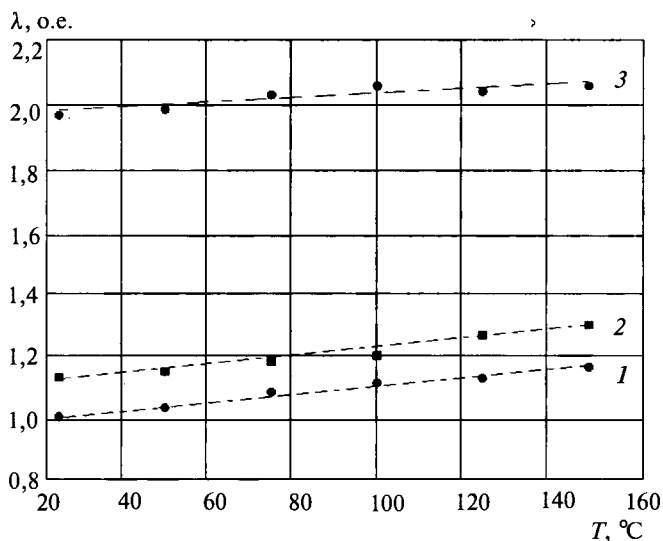


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплопроводности от температуры для образцов изоляции, изготовленных из предварительно пропитанных слюдосодержащих лент: 1 – стандартная лента (Элмикатерм 52409); 2 – опытная лента № 2; 3 – опытная лента № 3

ся монотонное увеличение коэффициента теплопроводности с ростом температуры, причём для образцов, изготовленных из лент с модифицированным лаком, значение  $\lambda$  в исследованном диапазоне температур максимально.

Термостабильность образцов изоляции, изготовленных из стандартной и опытной лент с модифицированным лаком, оценивалась при помощи термовесов STA 449 T3 (производства фирмы «Netzsch», Германия) в диапазоне температур от 20 до 700  $^\circ\text{C}$ . Точность измерения температуры в измерительной ячейке составляла 0,1 К. Схема измерительной ячейки прибора представлена на рис. 2.

На рис. 3 приведены зависимости изменения массы исследованных образцов в температурном диапазоне 20–700  $^\circ\text{C}$  и температуры, соответствующие фазовым переходам в исследованных образцах. Значения температуры первого фазового перехода ( $T_1$ ) для исследованных образцов изоляции, соответствующие началу их термической деструкции: стандарт-

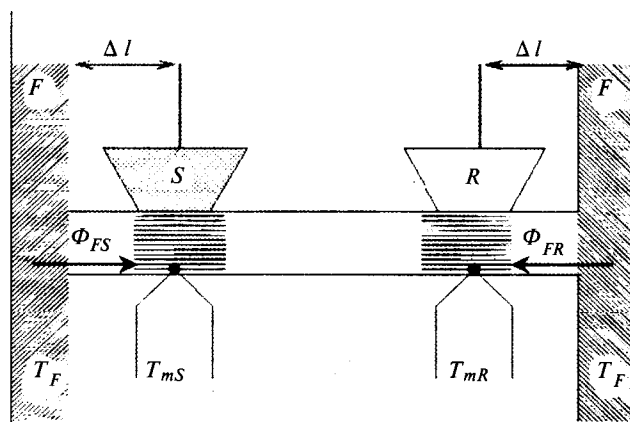


Рис. 2. Схема измерительной ячейки термовесов STA 449 T3: S – ячейка исследуемого образца; R – ячейка образца сравнения;  $\Phi_{FS}$  и  $\Phi_{FR}$  – тепловые потоки от нагревателя к измерительным ячейкам исследуемого образца и образца сравнения;  $T_F$  – температура нагревателя;  $T_{mS}$ ,  $T_{mR}$  – температура измеряемая в ячейках исследуемого образца и образца сравнения;  $\Delta l$  – расстояние от нагревателя до сенсора

ной ленты  $T_1 = 215,5 ^\circ\text{C}$ , опытного образца № 2  $T_1 = 274,1 ^\circ\text{C}$ . Результаты ДСК-анализа свидетельствуют о более высокой термической устойчивости изоляции, изготовленной из опытных лент, по сравнению с изоляцией, изготовленной из стандартной предварительно пропитанной ленты.

Оценка температурной зависимости диэлектрических потерь при различных уровнях испытательного напряжения проводилась на макетных образцах корпусной изоляции, которые изготавливались согласно заводской технологии. Результаты измерения  $\text{tg}\delta$  образцов изоляции, изготовленных из исследованных предварительно пропитанных лент, приведены в табл. 3. Как видно, увеличение испытательного напряжения не приводит к резкому росту диэлектрических потерь, что свидетельствует об отсутствии грубых технологических дефектов во всех исследованных образцах изоляции. При температуре 155  $^\circ\text{C}$  значения  $\text{tg}\delta$  для всех образцов изоляции не превышают установленное на данный вид продукции предельное значение (10%).

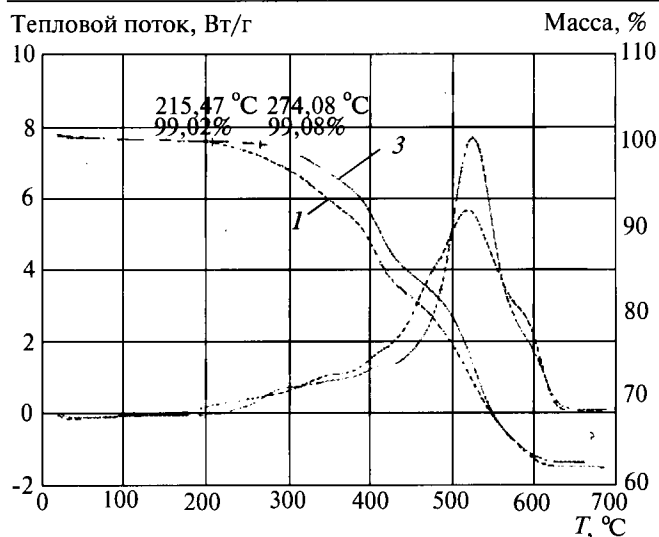


Рис. 3. Зависимости изменения массы исследованных образцов и температуры, соответствующие фазовым переходам в исследованных образцах изоляции, изготовленных из слюдосодержащих лент: 1 — стандартная лента (Элмикатерм 52409); 3 — опытная лента № 3

Таким образом, проведён анализ основных способов повышения теплопроводящей способности слюдосодержащих изоляционных материалов для создания корпусной изоляции мощных турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением.

### Список литературы

1. S. Nagano et al. Development of World's Largest Hydrogen-Cooled Turbine Generator// Conf. IEEE 2002. P. 657 – 663.
2. Андреев А.М., Азизов А.Ш., Костельов А.М. Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением// Электротехника. 2009. №3. С.10–14.
3. M. Tari, K. Yoshida, S. Sekito. A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators// Conf. IEEE 2003. P. 613 – 617.
4. H. Katayama et al. Development and Production of the World's Largest Capacity 2p- 60Hz-670MVA and 4p-60Hz-370MVA Hydrogen-Cooled Turbo-generators for a 60Hz-900MW Cross-Compound Thermal Power Plant// CIGRE 2010. A1-102.
5. Senn F et al. Improved Mica Insulation System for HV Rotating Machines//Proc. DISEE. 2006. Casta-Pila. P 113–116.
6. Miller M.L., Emery F.T. Thermal Conductivity of High Voltage Stator Coil Groundwall Insulation// EEIC Conf. 1997. Chicago. P. 619–622.
7. Тари М. и др. Система высоковольтной изоляции для турбогенераторов с увеличенной теплопроводностью// Тр. IV Межд. симпозиума Элмаш. М., 2002. С. 102–104.
8. Dal Mut G. et al. New Insulation Systems for Upgrading Large Turbo generators Driven by Gas and Steam Turbines// Power GEN Europe. 2006.
9. Takezawa Y. et al. High Thermal Conductive Epoxy Resins with Controlled High Order Structure//Proc/ 7th Int. Conf. Prop. and Appl. Diel Mater. 2003. S20-5.
10. Fukushima K. et al. High Thermal Conductive Epoxy Resins with Controlled High Order Structure// 2004 Annual Report Conf. on Elec. Insul. And Diel. Phenom. P. 340–343.
11. Han Z. et al. Thermal Properties of Composites Filled with Different Fillers// Conf. IEEE. 2008. P. 497–501.

**Андреев Александр Михайлович** — главный специалист по электроизоляционным материалам завода ОАО «Силовые машины» «Электросила» (С.-Петербург), доктор техн. наук. Окончил Чувашский государственный университет в 1972 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Диагностика пропитанной плёночной изоляции силовых электрических конденсаторов» в 2001 г.

**Азизов Андрей Шавкатович** — начальник центральной заводской лаборатории завода ОАО «Силовые машины» «Электросила» (С.-Петербург), канд. техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1980 г.

**Безбородов Андрей Андреевич** — аспирант кафедры «Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы» Санкт-Петербургского ГПУ (СПбГПУ). Окончил электромеханический факультет СПбГПУ в 2008 г. Лауреат стипендии Президента Российской Федерации на обучение за рубежом в 2009 г. В 2009–2010 гг. проходил обучение на факультете «Электротехника» в Университете Западной Богемии в Плзани (Чешская Республика).

**Папков Андрей Владимирович** — заместитель генерального директора по техническому развитию ОАО «Холдинговая компания Элинар», канд. техн. наук. Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г. Защитил диссертацию в МИТХТ по специальности «Химическая технология основного органического синтеза» в 1991 г.

**Пак Владимир Моисеевич** — работал главным специалистом по электроизоляционным материалам в ОАО «Холдинговая компания Элинар», доктор техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Усовершенствование изоляции крупных электрических машин» в 2000 г.

# **Оценка состояния системы изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин по результатам измерения статистических характеристик частичных разрядов**

АНДРЕЕВ И.А., АМОСОВ В.В., ЛЯХОВСКИЙ Ю.З.

*Проведено исследование статистических характеристик амплитудных и амплитудно-фазовых спектров ЧР в изоляции модельных образцов с искусственными дефектами в полупроводящем покрытии. Разработан и использован на практике алгоритм распознавания дефектов изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин по статистическим параметрам спектров ЧР.*

**Ключевые слова:** изоляция статорной обмотки, частичный разряд, распределение, дефект, идентификационный признак.

В последние десятилетия в мировой практике растёт практический интерес к разработке информативных и надёжных способов диагностики электрической изоляции высоковольтных электрических машин. Одним из таких неразрушающих способов является методика, основанная на измерении характеристик частичных разрядов (ЧР) в изоляции. Подобные методики позволяют произвести оценку степени дефектности различных типов электромашиной изоляции по характеристикам ЧР и создают предпосылки для определения остаточного ресурса системы электрической изоляции. Следует подчеркнуть, что измерения и анализ характеристик ЧР являются мощным инструментом для надёжного выявления различных дефектов систем изоляции, которые зачастую не могут быть выявлены другими методами измерений.

Согласно принятому в 2006 г. Стандарту МЭК [1], статистические характеристики (амплитудные и амплитудно-фазовые распределения) ЧР являются наиболее информативными признаками наличия различных технологических дефектов в системах изоляции высоковольтных электрических машин. Поэтому измерение таких характеристик становится общепринятой практикой при оценке качества высоковольтных машин. Корректное измерение, математическая обработка и анализ этих характеристик позволит улучшить контроль качества изготовления корпусной изоляции

*Research of statistical characteristics of PD distributions is conducted in insulation of modeling samples with artificial defects in a semiconducting covering in end-winding area. The algorithm of recognition of defects of stator winding insulation of high-voltage electric machines on statistical parameters of PD distributions is developed and used in a practice.*

**Key words:** stator winding insulation, partial discharge, distribution, defect, identification index.

(как изоляции отдельных стержней или катушек, так и собранных статорных обмоток электрических машин).

Для обеспечения этих важных задач необходимо разработать и внедрить достоверные аппаратные способы регистрации статистических характеристик ЧР, алгоритмы распознавания типов технологических дефектов изоляции (источников ЧР) и выработать на этой основе научно-обоснованные критерии отбраковки.

Измерение характеристик ЧР используется как метод для оценки качества новой изоляции, а также для локализации источников ЧР в состаренной статорной обмотке. ЧР измеряются как на полностью собранной статорной обмотке, так и на её индивидуальных компонентах (катушках, стержнях, электрических вводах и т.д.).

Поскольку ЧР являются чувствительной характеристикой состояния изоляции, измерение их параметров позволяет:

- с высокой достоверностью выявить механизмы, разрушающие изоляцию и степень деградации изоляции на самых ранних стадиях возникновения старения;

- контролировать процесс старения изоляции во времени.

Это, в свою очередь, позволяет внедрить прогнозирующее техническое обслуживание испытываемого оборудования:

– выявить наличие слабых зон (дефектов) в изоляционной системе;

– провести конкретные превентивные ремонтные мероприятия в соответствии с результатами измерений характеристик ЧР;

– запланировать необходимость очередных испытаний и определить оптимальные межремонтные интервалы.

Важнейшим этапом исследования является идентификация дефектов изоляции, выполняемая на основе анализа измеренных параметров ЧР и сравнения их с базой данных (обучающая выборка), составленной по результатам экспериментов с использованием модельных испытательных образцов с различными типами искусственно созданных дефектов системы изоляции с контролируемыми геометрическими размерами.

Для реализации этой задачи были проведены измерения параметров ЧР, развивающихся в специально разработанных модельных образцах с искусственно созданными дефектами изоляции, в каждом из которых реализуется какой-либо единственный тип ЧР, присущий системе статорной изоляции (внутренний, пазовый, поверхностный и т.д.) [2]. Модельные образцы представляли собой уменьшенные копии статорных стержней в виде медных шин прямоугольного сечения размерами 800×30×6 мм, изоляция которых изготавливалась из предварительно пропитанных лент Элмикатерм 52409 (производства ОАО «ХК Элинар»). Расчётная толщина изоляции макетов составляла 2 мм.

Особое внимание в работе уделялось изучению и идентификации ЧР, возникающих в лобовых и межфазных частях статорной обмотки высоковольтных электрических машин, одной из наиболее важных областей конструкции статорной обмотки [2,3]. Модельный образец в этом случае представлял собой макет с искусственным повреждением лобового полупроводящего покрытия в виде нарушения его сплошности (продольного повреждения шириной 2,5 мм и длиной от 3,5 до 10,5 мм) на границе раздела между пазовым проводящим и лобовым полупроводящим покрытием. В этом случае ЧР представляют собой поверхностные электрические разряды в лобовой части макета в области искусственного дефекта. Для сравнения ЧР измерялись также и в модельном образце, где искусственные дефекты отсутствовали.

Измерения ЧР проводились электрическим методом, согласно отечественному и международным стандартам [4–6] на промышленной

частоте переменного тока при комнатной температуре. В модельных образцах с искусственно созданными дефектами измерения проводились по схеме с последовательным соединением измерительного сопротивления с измеряемым объектом, в реальных стержнях и в статорных обмотках электрических машин – по схеме с последовательным соединением измерительного сопротивления с соединительной ёмкостью. В качестве измерительного прибора использовался цифровой измерительный комплекс «СКИТ» (производства ФГУП СПбГПУ), регистрирующий следующие параметры ЧР:

– максимальный кажущийся заряд ЧР при скорости повторения импульсов ЧР выше 10 имп/с ( $q_{\max\text{ЧР}}$ );

– частота повторения импульсов ЧР ( $n_{\text{ЧР}}$ ) и средний ток ЧР ( $I_{\text{ЧР}}$ );

– амплитудные спектры ЧР, т.е. массивы данных ( $n_{i\text{ЧР}}$ ,  $q_{i\text{ЧР}}$ );

– фазовое распределение ЧР ( $n_{i\text{ЧР}}$ ,  $q_{i\text{ЧР}}$ ,  $\varphi_{i\text{ЧР}}$ ) в пределах периода напряжения промышленной частоты (амплитудно-фазовые спектры).

Принцип работы измерительного комплекса заключается в регистрации импульсов тока, протекающих в высоковольтном разрядном контуре при ЧР в измерительном объекте. Для выделения высокочастотного импульса использовался активный электрический датчик. Сигнал с датчика поступает на блок подготовки и преобразования сигнала, затем подготовленный сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, который производит его измерение и обработку. Граничная частота измерительного комплекса составляет 50 МГц.

Измерительный комплекс обеспечивает устойчивую синхронизацию измерений ЧР с напряжением промышленной частоты, приложенным к модельному образцу. Синхронизация осуществляется путём подачи напряжения с первичной обмотки регулятора основного источника высокого напряжения высоковольтной установки через формирователь синхросигнала на вход внешней синхронизации. В результате обеспечивается измерение параметров ЧР на положительном и отрицательном полупериодах приложенного напряжения, что обеспечивает процесс идентификации источников ЧР при измерениях.

Алгоритм действий по идентификации типа дефектов в электрической изоляции, производимый по результатам измерения статистиче-

ских характеристик ЧР, включает следующие этапы.

На первом этапе собственно измеряются амплитудные и амплитудно-фазовые спектры ЧР раздельно на положительной и отрицательной полярности испытательного напряжения за фиксированные промежутки времени измерения при определённом значении испытательного напряжения. Спектры ЧР представляются в цифровой форме, после чего производится расчёт и выбор наиболее характерных идентификационных признаков, определяющих основные качественные и количественные особенности этих спектров. Цель выбора признаков состоит в том, чтобы понизить размерность спектра ЧР, используя некоторые его особенности и свойства. Существенное условие – идентификационные признаки спектра должны различаться между различными источниками ЧР так же, как и измеренные спектры ЧР.

В качестве конкретных идентификационных признаков в работе использовались численные значения центральных моментов амплитудных и амплитудно-фазовых распределений ЧР:

– первый ( $\bar{q}_{\text{ЧР}}$  – среднее значение кажущегося заряда ЧР спектра) и второй ( $\sigma$  – стандартное отклонение) моменты;

– третий (коэффициент асимметрии  $S$ ) и четвёртый (коэффициент эксцесса  $K$ ) моменты, рассчитываемые по формулам:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (q_{i\text{ЧР}} - \bar{q}_{\text{ЧР}})^3 p_i}{\sigma^3 \sum_{i=1}^N p_i}; \quad (1)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (q_{i\text{ЧР}} - \bar{q}_{\text{ЧР}})^4 p_i}{\sigma^4 \sum_{i=1}^N p_i} - 3, \quad (2)$$

где  $q_{i\text{ЧР}}$  – измеренное значение кажущегося заряда ЧР в  $i$ -м канале измерительного устройства;  $N$  – количество фазовых каналов в полупериоде приложенного испытательного напряжения (положительном и отрицательном отдельно);  $p_i$  – вероятность частоты появления  $q_{i\text{ЧР}}$  в  $i$ -м канале измерительного устройства.

Важными идентификационными признаками спектров ЧР являются параметры, определяющие различия в спектрах ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения:

– коэффициент корреляции

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N q_i^+ q_i^- - \sum_{i=1}^N q_i^+ \sum_{i=1}^N q_i^- / N}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (q_i^+)^2 - \left( \sum_{i=1}^N q_i^+ \right)^2 / N \right] \left[ \sum_{i=1}^N (q_i^-)^2 - \left( \sum_{i=1}^N q_i^- \right)^2 / N \right]}}; \quad (3)$$

– коэффициент асимметрии по значению кажущегося заряда

$$Q = \frac{\sum q_i^- / \sum n_i^-}{\sum q_i^+ / \sum n_i^+}, \quad (4)$$

где  $\sum q_i^-$  и  $\sum q_i^+$  – сумма значений кажущихся зарядов ЧР;  $\sum n_i^-$  и  $\sum n_i^+$  – суммарное количество импульсов ЧР за отрицательный и положительный полупериод, соответственно.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости интегральных характеристик ЧР ( $q_{\text{maxЧР}}$ ,  $I_{\text{ЧР}}$ ) от испытательной напряжённости электрического поля для модельных образцов. Как видно, характеристики ЧР в модельном образце с искусственным дефектом полупроводящего покрытия существенно выше, чем в случае испытательного стандартного образца статорной изоляции, где возникновение ЧР при напряжённости, превышающей рабочее значение, обусловлено, главным образом, случайными причинами, например, наличием микротрещин и газовых пузырьков в изоляции. Увеличение среднего тока ЧР с ростом испытательной напряжённости обусловлено в основном ростом частоты повторения импульсов ЧР (рис. 2). Тем не менее, качественный характер представленных зависимостей как у модельного образца с искусственным дефектом, так и у бездефектного образца практически идентичен.

При сравнении спектров ЧР для исследуемых образцов изоляции, установлено, что для каждого из исследованных модельных образцов они характеризуются определённым набором различных по значениям идентификационных признаков. Как следует из рис. 3 и 4, основное различие наблюдается в значениях коэффициента эксцесса для положительного и отрицательного полупериода ( $K^+$  и  $K^-$ ) соответственно. Значения  $K^+$  и  $K^-$  для модельного образца с искусственным повреждением полупроводящего покрытия более, чем в три раза превышают соответствующие значения, характерные для модельных образцов без ис-



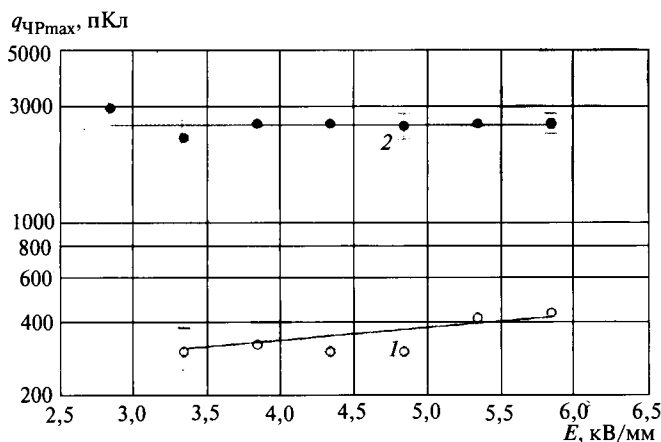


Рис. 1. Зависимости максимального кажущегося заряда ЧР в модельных образцах от испытательного напряжения: 1 – модельный образец без искусственных дефектов; 2 – модельный образец с искусственным дефектом (2,5×10,5 мм) полупроводящего покрытия

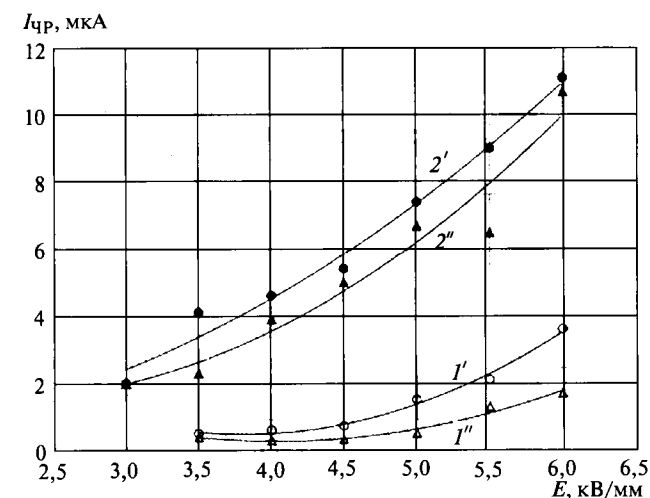


Рис. 2. Зависимости среднего тока ЧР в модельных образцах от испытательного напряжения: 1 – модельный образец без искусственных дефектов; 2 – модельный образец с искусственным дефектом (2,5×10,5 мм) полупроводящего покрытия (1', 2' – отрицательный полупериод; 1'', 2'' – положительный полупериод)

кусственных дефектов. Поскольку коэффициент эксцесса фазового распределения характеризует степень сосредоточенности фазовых углов возникновения импульсов ЧР, то, очевидно, он имеет тесную корреляционную связь с пространственной сосредоточенностью ЧР в изоляции. Высокие значения коэффициентов  $K^+$  и  $K^-$  (рис. 4) свидетельствуют о том, что зона возникновения ЧР в модельном образце ограничена небольшой пространственной областью – границами искусственного дефекта в полупроводящем слое. И наоборот, при малых значениях  $K^+$  и  $K^-$  (рис. 3) ЧР рассредоточены в достаточно широком объеме образца, что, по-видимому, свидетельствует о появлении их в микроскопических дефектах, случайно распределённых в изоляции образца.

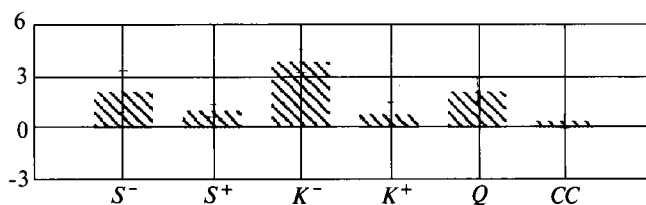


Рис. 3. Идентификационные признаки спектров ЧР в модельном образце без искусственных дефектов

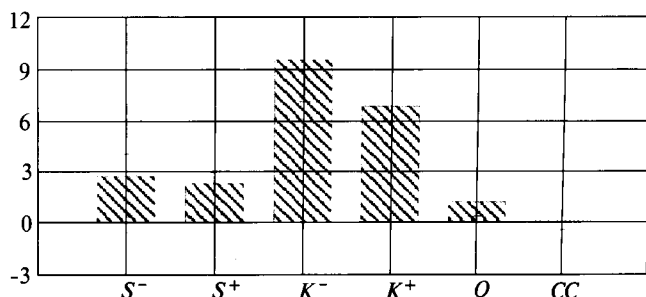


Рис. 4. Идентификационные признаки спектров ЧР в модельном образце с искусственным дефектом (2,5×10,5 мм) полупроводящего покрытия

Таким образом, осуществляется формирование базы данных по характерным формам и количественным параметрам спектров ЧР в модельных образцах и реальных системах изоляции обмоток электрических машин с учётом значений испытательных напряжений, времени старения, места расположения дефектов в обмотке и т.д. С этой точки зрения важным является набор статистических данных по характеристикам ЧР в реальных статорных обмотках электрических машин различных типов как в процессе сдаточных испытаний, так и в процессе их эксплуатации.

При проведении приёмо-сдаточных испытаний статорной обмотки турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 160 МВт были зарегистрированы амплитудные (рис. 5,а) и амплитудно-фазовые (рис. 5,б) спектры ЧР при испытательном напряжении 16 кВ. Измерения ЧР проводились электрическим методом в режиме «off-line» на каждой фазе отдельно (при этом остальные фазы были заземлены) при комнатной температуре. Регистрация импульсов ЧР проводилась за время, соответствующее 20 периодам приложенного испытательного напряжения, градуировка измерительного комплекса (по значению кажущегося заряда) по техническим причинам не проводилась. Значения идентификационных признаков зарегистрированных спектров ЧР приведены на рис. 6. Как следует из полученных результатов, основной набор идентификационных признаков спектров ЧР в системе изоляции статорной обмотки в диапазоне ис-

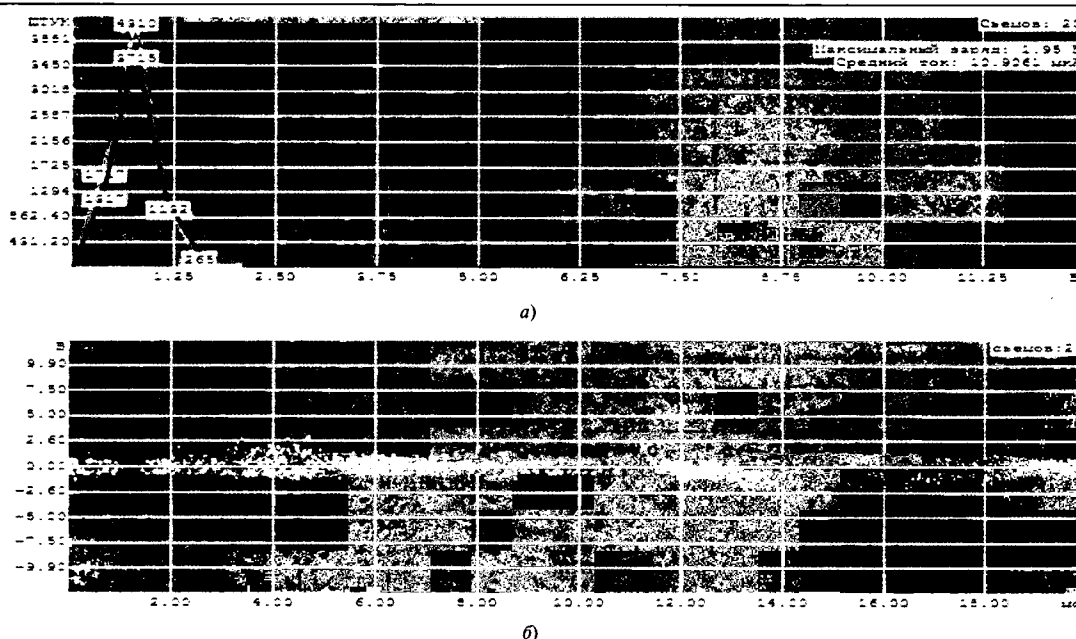


Рис. 5. Амплитудные (а) и амплитудно-фазовые (б) спектры ЧР при испытательном напряжении 16 кВ, возникающие в изоляции статорной обмотки турбогенератора мощностью 160 МВт

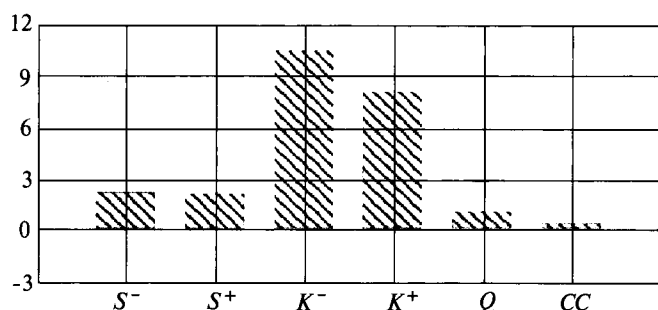


Рис. 6. Идентификационные признаки спектров ЧР в изоляции статорной обмотки турбогенератора мощностью 160 МВт

пытательных напряжений от 4 до 16 кВ, совпадает с соответствующим набором для модельных образцов с искусственным повреждением полупроводящего покрытия (рис. 4). Характер распределений кажущихся зарядов ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения асимметричный, с более высокой интенсивностью импульсов ЧР отрицательной полярности.

В результате анализа спектров ЧР в изоляции статорной обмотки турбогенератора установлена их идентичность (по набору основных идентификационных признаков и внешнему виду) со спектрами ЧР в искусственных дефектах изоляции типа нарушения полупроводящего лобового покрытия, что позволяет сделать заключение, что наиболее вероятной причиной возникновения ЧР в статорной обмотке турбогенератора при приёмо-сдаточных испытаниях являются слабые ионизационные процессы в лобовой зоне, традиционно наблюдающиеся в системе изоляции любой электри-

ческой машины высокого напряжения и не представляющие опасность для её нормальной эксплуатации.

### Выводы

1. Проведены исследования по изучению статистических параметров амплитудных и амплитудно-фазовых распределений (спектров) ЧР в модельных образцах изоляции статорной обмотки с различными типами искусственных дефектов, при этом детально изучены закономерности возникновения и развития ЧР в дефектах лобовых зон статорной обмотки высоковольтных электрических машин.

2. Разработан алгоритм распознавания дефектов изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин по статистическим параметрам (идентификационным признакам) спектров ЧР.

3. Методика распознавания дефектов по статистическим характеристикам ЧР апробирована при приёмо-сдаточных испытаниях высоковольтных электрических машин высокой мощности.

### Список литературы

1. IEC 60034-27: Rotating Electrical Machines. Part 27: Partial Discharge Off-line Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Machinery, 2006.
2. Андреев А.М., Талжибаев А.И., Монастырский А.Е. Оценка технического состояния электрических двигателей и генераторов на основе анализа частичных разрядов. СПб: ПЭИПК, 2007.
3. Ваксер Б.Д., Коган В.О., Чернявский В.П. Проблемы использования высоковольтной изоляции в статорных обмотках турбогенераторов, работающих в воздушной среде // Электро-техника. 1991. №7. С.42–47.

4. ГОСТ 20074-83 Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. Изд-во Стандартов, 1983.

5. IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery// IEEE SA Standards Board, 2000.

6. International Standard. High-Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurements IEC 60270, 2000.

Андреев Иван Александрович — ассистент Санкт-Петербургского государственного политехнического уни-

верситета. Окончил факультет технической кибернетики Санкт-Петербургского ГПУ в 2009 г.

Амосов Владимир Владимирович — доцент Санкт-Петербургского ГПУ, канд. техн. наук. Окончил факультет технической кибернетики Ленинградского политехнического института в 1978 г.

Ляховский Юрий Залманович — начальник лаборатории Санкт-Петербургского ГПУ, канд. физ.-мат. наук. Окончил радиофизический факультет Ленинградского политехнического института в 1972 г.

## Ресурсные испытания систем изоляции класса нагревостойкости Н (180°C) тяговых двигателей локомотивов

ПАПКОВ А.В., БЕРЕЗИНЕЦ Н.И., КИРЕЕВ А.В., ПАК В.М.

Дано краткое описание систем изоляции тяговых электродвигателей класса нагревостойкости Н (180°C) на основе полиимидной и полиэтиленнафталатной плёнок. Приведены методики и основные результаты ресурсных испытаний различных систем изоляции.

**Ключевые слова:** электроизоляционные материалы, системы изоляции, тяговые двигатели, полиэтиленнафталатная плёнка.

В последние годы наблюдается устойчивый рост объёмов потребления электроизоляционных материалов (ЭИМ) для систем изоляции ТЭД класса нагревостойкости Н (180 °С) производителями тяговых электродвигателей (ТЭД), а также ОАО «Желдорреммаш». Наиболее широко для этих целей как в России, так и за рубежом применяются ЭИМ на основе слюдяных бумаг, стеклотканей и полиимидных плёнок. ОАО «Холдинговая компания Элинар», имея большой опыт разработок и производства ЭИМ, серийно выпускает полный комплект материалов для систем изоляции ТЭД класса нагревостойкости Н (180 °С). Основными элементами данной системы изоляции являются — стеклослюдинитовая лента с полиимидной плёнкой Элмикатерм 529029 для корпусной изоляции катушек, Синтофлекс 828 в качестве пазовой изоляции и пропиточный компаунд Элком ПК-21. Результаты ресурсных испытаний данной системы изоляции, подтверждающие её класс нагревостойкости, опубликованы в журнале «Электротехника» №3 за 2009 г.<sup>1</sup> Более чем семилетняя практика

*Short description of insulating systems H class based on polyimide and polyethylene naphthalate films is given. Methods and main results of resource tests of different insulating systems are described.*

**Key words:** electrical insulating materials, insulation systems, traction motors, polyethylene naphthalate film.

применения этих материалов электромашиностроительными и ремонтными предприятиями России, стран СНГ и Балтии показала их высокую технологичность и надёжность.

Тем не менее, ОАО «ХК Элинар», как разработчик ЭИМ, постоянно ведёт работу с ведущими производителями стеклотканей, полимерных плёнок, химических продуктов с целью создания новых ЭИМ с более высокими электрофизическими свойствами и низкой себестоимостью. Определённый интерес с этой точки зрения представляет полиэтиленнафталатная (ПЭН) плёнка, выпускаемая компанией «DuPont Teijin Films» под торговой маркой «Teonex». Из технического описания этой плёнки следует, что согласно стандарту UL746В ПЭН плёнка имеет класс нагревостойкости F (155°C), при этом продолжительная температура эксплуатации в электрическом поле составляет 180 °С, а продолжительная температура эксплуатации в условиях механических нагрузок — 160 °С.

Поскольку данные о ресурсных испытаниях систем изоляции класса нагревостойкости Н (180 °С) на основе полиэтиленнафталатной плёнки в открытой печати отсутствуют, целью проведённых испытаний была оценка класса нагревостойкости и возможности применения

<sup>1</sup>Пак В.М., Папков А.В., Мельниченко А.П. и др. Основные результаты тестирования системы изоляции класса нагревостойкости Н (180°C) на основе материалов производства ОАО «ХК Элинар» // Электротехника. 2009. № 3. С.44–47.

ЭИМ содержащих ПЭН плёнку в системах изоляции класса нагревостойкости Н (180 °С). Испытания проводились в ОАО «ВЭЛНИИ», г. Новочеркасск, располагающим на сегодня единственным в России и странах СНГ сертифицированным испытательным центром тягового электрооборудования.

Макеты корпусной изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя были изготовлены с применением двух марок стеклослюдинитовых лент.

1. Опытная предварительно пропитанная электроизоляционная лента марки, Элмикатерм 529039 производства ОАО «ХК Элинар», содержащая слюдяную бумагу, стеклоткань и полиэтиленнафталатную плёнку; «Теонех», тип Q51 компании «DuPont Teijin Films». При производстве данной ленты использовалось связующее, применяемое для производства серийной ленты Элмикатерм 529029. Предполагаемый класс нагревостойкости системы изоляции на основе ленты Элмикатерм 529039 - Н(180 °С).

2. Серийная предварительно пропитанная лента марки Элмикатерм 529029 (ТУ 3492-038-501571262003) производства ОАО «ХК Элинар», содержащая слюдяную бумагу, стеклоткань и полиимидную плёнку. Класс нагревостойкости системы изоляции на основе ленты Элмикатерм 529029 - Н (180 °С), подтверждён, в том числе ресурсными испытаниями, выполненными в ОАО «ВЭЛНИИ».

Испытания по оценке нагревостойкости системы изоляции на основе ленты, содержащей плёнку «Теонех» реализованы методом совместного теплового и электрического старения при трёх температурах, выбранных по ГОСТ 10518 для класса нагревостойкости Н(180°С) и ступенчато повышаемом испытательном напряжении промышленной частоты (шаг подъёма напряжения - 0,5кВ; выдержка на каждой ступени - 8 ч; начальное значение - 25% от минимального пробивного напряжения макетов систем изоляции в исходном состоянии).

Достоверность результатов испытаний обеспечивалась тем, что параллельно с исследуемой системой испытывалась система изоляции на основе ленты Элмикатерм 529029, гарантировано соответствующая классу нагревостойкости Н(180 °С). Способ изготовления макетов систем изоляции и их геометрические параметры идентичны.

Макеты воспроизводили корпусную изоляцию якорной обмотки тягового электродвигателя с номинальным напряжением 1 кВ. Их

конструкция и технология изготовления представлены в табл. 1.

В качестве характеристики устойчивости систем изоляции к одновременному воздействию испытательных температур и ступенчато поднимаемого старящего напряжения введён формализованный показатель - суммарная электрическая нагрузка ( $\eta_{\Sigma}^j$ ), рассчитываемая для каждого макета следующим образом:

$$\eta_{\Sigma}^j = \sum_{i=1}^{m_j} (\eta_i) + \eta_{m_{j+1}}^j,$$

где  $\eta_i^j = \left[ \frac{U_1}{U_0} + (i-1) \frac{\Delta U}{U_0} \right] t$  - электрическая нагрузка

ка  $j$ -го макета на  $i$ -й ступени испытательного напряжения, ч;  $i$  - порядковый номер ступени напряжения;

$\eta_{m_{j+1}}^j = \left( \frac{U_1}{U_0} + m_j \frac{\Delta U}{U_0} \right) \Delta t^j$  - электрическая нагрузка

ка  $j$ -го макета на  $(m_j + 1)$  ступени испытательного напряжения, ч;  $m_j$  - порядковый номер ступени напряжения, предшествующей той, на которой произошёл пробой изоляции  $j$ -го макета;  $(m_j + 1)$  - порядковый номер ступени напряжения, на которой произошёл пробой изоляции  $j$ -го макета;  $U_0$  - напряжение изоляции;  $U_1$  - напряжение первой ступени;  $\Delta U$  - шаг повышения испытательного напряжения;  $t$  - длительность выдержки макетов на каждой ступени испытательного напряжения;  $\Delta t^j$  - длительность испытаний  $j$ -го макета на  $(m_j + 1)$  ступени испытательного напряжения, ч.

На основе значений  $\eta_{\Sigma}^j$  для каждого макета и каждого значения температуры испытаний построены интегральные функции распределения рассматриваемого показателя систем изоляции макетов, рис. 1-3, наглядно демонстрирующие преимущества системы изоляции на основе ленты Элмикатерм 529029 в части устойчивости к одновременному воздействию испытательных температур и старящего напряжения.

Характерно, что при температуре  $240 \pm 3^\circ\text{C}$  уже на первой ступени напряжения, менее чем через 0,5 ч с начала испытаний последовательно вышло из строя 70% макетов системы изоляции на основе ленты, содержащей плёнку «Теонех». Пробои сопровождались возгоранием изоляции, что крайне редко наблюдается при проведении испытаний систем изоляции по классу нагревостойкости Н(180 °С). Испытания оставшихся макетов варианта 1

Таблица 1

Конструкция и технология изготовления макетов корпусной изоляции якорной обмотки

Составляющие макета и технологические операции	Вариант 1	Вариант 2
Проводник, 2 шт	Медная шина 2,24×5,3×250 мм	
Корпусная изоляция	Лента Элмикатерм 529039 0,11×20 мм, 4 сл., в 1/2 шир.	Лента Элмикатерм 529029 0,11×20 мм, 4 сл., в 1/2 шир.
Покровная изоляция	Лента марки ЛЭСБ 0,1×20 мм, 1 сл., в 1/2 шир.	
Расчётная толщина изоляции, мм	1,08	1,08
Нагрев перед пропиткой	(80±3) °С – в течение 3 ч	
Пропиточный состав	Компаунд Элком® ПК-21(э)	
Способ пропитки	Вакуум-нагнетательный	
Термообработка	(140±3) °С – в течение 2 ч; (180±3) °С – в течение 8 ч	
Количество макетов	40	40

Таблица 2

Состояние срезов изоляции

Вариант изоляции макетов (марка ленты)	Температура испытаний, °С		
	200±3	220±3	240±3
Вариант 1 (Элмикатерм 529039)	Структура среза монолитна; плёнка «Теопех» ломается при изгибе на угол 90°	Структура среза рыхлая; плёнка «Теопех» очень хрупкая	Структура среза рыхлая; плёнка «Теопех» полностью разрушилась, находится в пылевидном состоянии
Вариант 2 (Элмикатерм 529029)	Структура среза монолитна; полиимидная плёнка сохранила гибкость	Структура среза монолитна; полиимидная плёнка ломается при перегибе на 180°	Структура внешних слоев среза рыхлая; полиимидная плёнка хрупкая

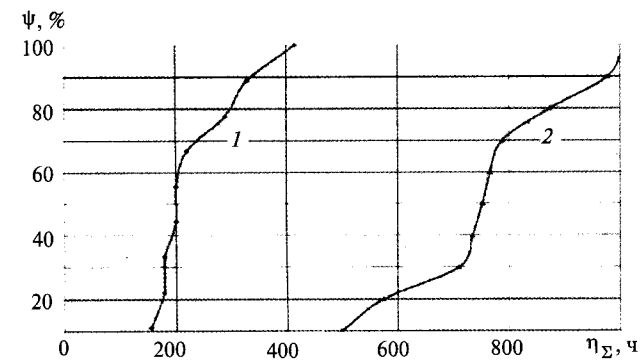


Рис. 1. Интегральные функции распределения суммарных электрических нагрузок, температура (200±3)°С (номера зависимостей совпадают с номерами вариантов, табл. 1)

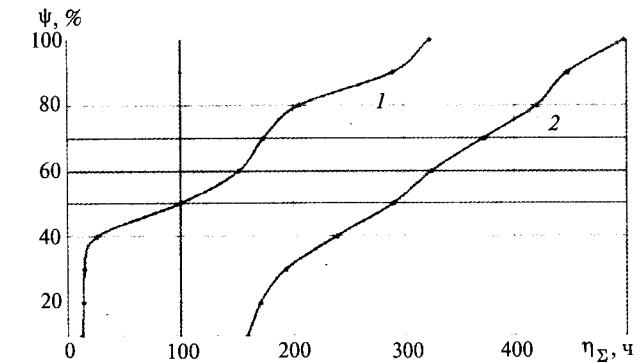


Рис. 2. Интегральные функции распределения суммарных электрических нагрузок, температура (220±3)°С (номера зависимостей совпадают с номерами вариантов, табл. 1)

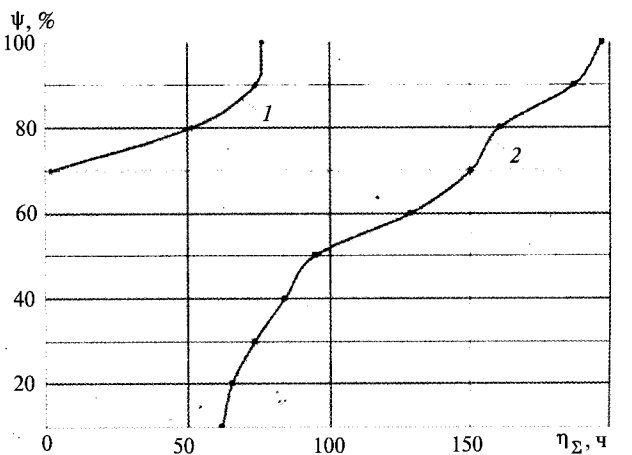


Рис. 3. Интегральные функции распределения суммарных электрических нагрузок, температура (240±3)°С (номера зависимостей совпадают с номерами вариантов, табл. 1)

были продолжены до 100% выхода из строя, однако полученные результаты имеют только факультативное значение и не могут быть использованы при дальнейшей обработке результатов испытаний, в частности построении, по аналогии с ГОСТ 10518, зависимости средне-логарифмического значения суммарной электрической нагрузки ( $\lg \eta_{\Sigma}$ ) от температуры (график Аррениуса).

Визуальный осмотр состояния компонентов систем изоляции, после воздействия старящих нагрузок (табл. 2), показал, что скорость деградации полиэтиленнафталатной плёнки «Теопех» существенно выше, чем полиимидной плёнки.

Исходя из результатов испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Класс нагревостойкости системы изоляции на основе ленты Элмикатерм 529039, содержащей полиэтиленнафталатную плёнку, не соответствует классу нагревостойкости Н(180 °С).

2. Применение полиэтиленнафталатных плёнок в системах изоляции тяговых двигателей локомотивов класса нагревостойкости Н (180 °С) не гарантирует требуемых норм пробега электрических машин до проведения капитального ремонта.

**Папков Андрей Владимирович** — заместитель генерального директора по техническому развитию ОАО «Холдинговая компания Элинар», канд. техн. наук.

Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г. Защитил диссертацию в МИТХТ по специальности «Химическая технология основного органического синтеза» в 1991 г.

**Березинец Николай Иванович** — заведующий отделом изоляции и пластмасс ОАО «ВЭЛНИИ», канд. техн. наук. Окончил физико-технический факультет Воронежского политехнического института в 1977 г. Защитил диссертацию по теме «Математическое моделирование квазистационарного электромагнитного поля в шихтованных сердечниках электрических машин при индукционном нагреве» в 1988 г.

**Киреев Александр Владимирович** — директор НИР и ИЦ ОАО «ВЭЛНИИ», канд. техн. наук, доц. Окончил энергетический факультет Южно-Российского ГТУ (Новочеркасского политехнического института) в 1999 г. Защитил диссертацию по теме «Разработка алгоритмов эффективного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом электропоезда» в 2004 г.

**Пак Владимир Моисеевич** — работал главным специалистом по электроизоляционным материалам в ОАО «Холдинговая компания Элинар», доктор техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Усовершенствование изоляции

## Основные результаты тестирования системы изоляции класса нагревостойкости 220 °С, на основе материалов производства ОАО «ХК Элинар»

БЕРЕЗИНЕЦ Н.И., ПАПКОВ А.В., МЕЛЬНИЧЕНКО А.П., КИРЕЕВ А.В., **ПАК В.М.**

*Дано краткое описание системы изоляции тяговых электродвигателей класса нагревостойкости 220 °С. Приведены основные результаты ускоренных испытаний данной системы изоляции.*

**Ключевые слова:** электроизоляционные материалы, системы изоляции, тяговые двигатели.

*Short description of insulating system for traction motors 220 °C class are given. Main results of tests this insulating system is described.*

**Key words:** electrical insulating materials, insulation systems, traction motors.

В последнее время российские и зарубежные производители тягового электрооборудования проявляют практический интерес к современным системам изоляции тяговых электродвигателей (ТЭД) класса нагревостойкости 220 °С.

ОАО «Холдинговая компания Элинар», имея богатый опыт разработки систем изоляции вращающихся электрических машин, предлагает систему изоляции ТЭД класса нагревостойкости 220 °С на основе современных электроизоляционных материалов собственного производства<sup>1</sup>. Испытания новой системы

изоляции были проведены в ОАО «ВЭЛНИИ» г. Новочеркасск, располагающем на сегодняшний день единственным в России и странах СНГ сертифицированным испытательным центром тягового электрооборудования.

Система изоляции на основе ленты Элмикатерм 525029 и кремнийорганического компаунда была применена в качестве корпусной изоляции обмоток статоров перспективных асинхронных тяговых электродвигателей, производство которых осваивается в ООО «ПК НЭВЗ».

Технологические характеристики ленты позволили решить следующие основные задачи:

— при ограниченной жёсткими расчётными рамками толщине сформировать возможно больший запас электрической прочности;

<sup>1</sup> Папков А.В., Мельниченко А.П., Пак В.М., Куимов И.Е. Современные электроизоляционные материалы для систем изоляции вращающихся электрических машин // Электротехника. 2009. №3. С. 4–9.

Таблица 1

## Физико-механические и электрические свойства ленты марки ЭЛМИКАТЕРМ 525029

Номинальная толщина, мм	0,08	0,10	0,11	0,13
Отклонение от номинальной толщины, мм:				
– среднее	0,01	0,01	0,01	0,02
– в отдельных точках	0,02	0,02	0,02	0,03
Массовая доля компонентов, %:				
– слюды, не менее	25	25	25	25
– связующего вещества	25–30	25–30	25–30	25–30
– летучих веществ, не более	1,5	1,5	1,5	1,5
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, Н/см, не менее	60	80	80	120
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	50	65	60	55

Таблица 2

## Конструкция моторет

Конструкция моторет и технологические операции	Элементы конструкции, материалы, режимы
Макет сердечника статора	Стальная Ш-образная конструкция, имитирующая геометрию пазов статора с прилегающими элементами зубцов и спинки
Проводник	Отрезок провода ППИПК-2 CR, длина $700 \pm 1$ мм, согнутый в средней части на ребро вокруг стержня $\varnothing(10 \pm 0,5)$ мм, с углом обхвата $180^\circ$
Количество проводников в моторете	Девять проводников, разделенных на три пакета по три проводника в каждом
Корпусная изоляция пакета	Лента Элмикатерм 525029
Покровная изоляция	Стеклолента ЛЭСБ-П(80)
Пазовая изоляция	Синтофлекс 828, 0,15
Изоляция между пакетами	Синтофлекс 828, 0,15
Клин пазовый	СПП-ЭУ
Прокладки под клин пазовый	Синтофлекс 828, 0,15
Способ пропитки	Вакуум-нагнетательный
Пропиточный состав	Кремнийорганический компаунд
Режим термообработки	200 °С, 12 ч
Количество моторет	24

– обеспечить минимум дефектообразования при выполнении изоляционных работ и обмотке статора.

Система изоляции прошла ускоренные испытания в объеме, эквивалентном 56000 ч, воздействия температуры 220 °С и расчетного рабочего напряжения 3,3 кВ.

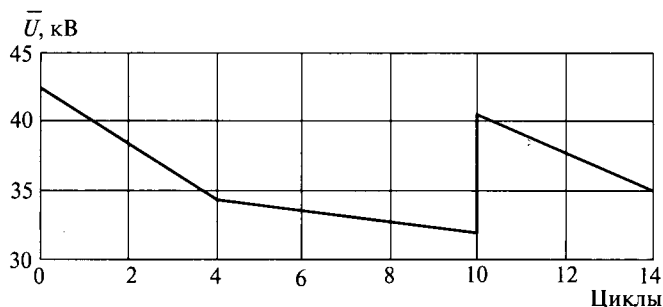
Дополнительно к основным (тепловым и электрическим) нагрузкам в процессе испытаний периодически реализовывались воздействия:

- влажности воздуха, суммарная продолжительность 290 ч;
- смены температуры среды от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+150^\circ\text{C}$ , общее количество циклов 100.

Испытания проводились на моторетах, изоляция которых воспроизводила полную версию системы изоляции статорной обмотки тягового электродвигателя (табл. 2) в циклическом формате, с периодическим контролем электрофизических параметров, включая напряжения пробоя. Количество моторет обеспечивало статистическую значимость получаемых результатов.

На всех этапах испытаний свойства системы изоляции сохраняли однородность (коэффициенты вариации всех параметров не превышали 7–8%) как в сухом, так и в увлажненном состояниях.

Снижение пробивного напряжения после первых десяти циклов нагрузок составило в среднем 25% (рисунок). Испытательный цикл эквивалентен 4000 ч воздействия температуры 200 °С и напряжения 3,3 кВ, 50 Гц. Повторная пропитка моторет привела к практически полному восстановлению электрической прочности изоляции и обеспечила её снижение под



Изменение средних значений пробивных напряжений системы изоляции в процессе испытаний

воздействием последующих четырёх циклов в той же степени, что и в начале испытательного процесса.

Полученные результаты свидетельствуют о высоких ресурсных возможностях рассматриваемой системы изоляции, являющихся предпосылкой для эксплуатационной надёжности, увеличения межремонтных пробегов электровозов и снижения затрат на их обслуживание.

С использованием данной системы изоляции изготовлена опытная партия асинхронных

тяговых электродвигателей. Их испытания не выявили каких-либо недостатков системы изоляции статорных обмоток.

**Березинец Николай Иванович** — заведующий отделом изоляции и пластмасс ОАО «ВЭЛНИИ», канд. техн. наук. Окончил физико-технический факультет Воронежского политехнического института в 1977 г. Защитил диссертацию по теме «Математическое моделирование квазистационарного электромагнитного поля в шихтованных сердечниках электрических машин при индукционном нагреве» в 1988 г.

**Папков Андрей Владимирович** — заместитель генерального директора по техническому развитию ОАО «Холдинговая компания Элинар», канд. техн. наук. Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г. Защитил диссертацию в МИТХТ по специальности «Химическая технология основного органического синтеза» в 1991 г.

**Мельниченко Александр Павлович** — начальник технического отдела ОАО «Холдинговая компания «Элинар». Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г.

**Киреев Александр Владимирович** — директор НИР и ИЦ ОАО «ВЭЛНИИ», канд. техн. наук, доц. Окончил энергетический факультет Южно-Российского ГТУ (Новочеркасского политехнического института) в 1999 г. Защитил диссертацию по теме «Разработка алгоритмов эффективного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом электропоезда» в 2004 г.

**Пак Владимир Моисеевич** — работал главным специалистом по электроизоляционным материалам в ОАО «Холдинговая компания Элинар», доктор техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Усовершенствование изоляции крупных электрических машин» в 2000 г.



# Перспективные электроизоляционные материалы для систем изоляции электрических машин

ПАК В.М., САФОНОВ Г.П., ПАПКОВ А.В., ВОРОБЬЁВ П.В.

*Дано краткое описание перспективных электроизоляционных материалов для систем изоляции электрических машин. Приведены технические характеристики новых ЭИМ.*

**Ключевые слова:** электроизоляционные материалы, эпоксидные смолы, полимерные плёнки, слюдяные бумаги.

В настоящее время эпоксидные смолы нашли широкое применение в электротехнике благодаря хорошим, а часто и незаменимым механическим, электрофизическим и технологическим свойствам.

Эпоксидные смолы используются в качестве основы или как один из компонентов при заливке и пропитке электронных схем, блоков, моточных изделий. Низкая вязкость эпоксидных компаундов позволяет их использовать не только для пропитки обмоток с высоким коэффициентом заполнения паза, но и для пропитки пористой изоляции высоковольтных обмоток, содержащих слюдяные бумаги, стеклоткани, полимерные плёнки и другие материалы [1]. Для получения монолитной изоляции без воздушных включений применяются специальные технологические процессы пропитки при повышенной температуре, с использованием вакуума, повышенного давления, прессования и ряд других технологических приёмов. В состав пропиточных компаундов помимо эпоксидной смолы, как правило, входит отвердитель, что вызывает повышение вязкости компаундов со временем и делает невозможным их дальнейшее использование.

Одним из путей создания новых систем изоляции, в том числе высоковольтных электрических машин, может быть использование эпоксидной смолы без отвердителя, при условии наличия отвердителя в пропитываемой системе. Одним из таких вариантов является процесс отверждения эпоксидных смол полиарилатами на основе изо- и терефталевых кислот и их ангидридов.

Состав, содержащий эквимольные количества эпоксидной смолы и порошкообразного

*In the article short description of the new insulating materials for electrical machine's insulation systems. Technical characteristics of the new EIM are described.*

**Key words:** electrical insulating materials, epoxy resins, polymer films, mica papers.

полиарилата с добавлением 4–8% воды [2] обладает свойствами, приведёнными в табл. 1.

При оптимальном содержании воды образуются продукты с наибольшей плотностью сшивки. Введение воды в эпоксидно-полиарилатную композицию позволяет расплавить порошок полиарилата при 140–160 °С и получить промежуточный низковязкий продукт, который можно перерабатывать обычными методами литья и отверждать на стадии формирования изделий. Такая эпоксидно-полиарилатная композиция может быть использована для изготовления электроизоляционных материалов. По ряду свойств и способности к переработке она превосходит полиарилаты и другие эпоксидно-полиарилатные композиции, полученные с применением отвердителей.

Важной характеристикой электроизоляционных материалов является длительная допустимая температура их эксплуатации. Для её оценки определялись термогравиметрические индексы эпоксидно-полиарилатных композиций различного состава. Термогравиметрический индекс композиции, содержащей 40–60% полиарилата, составляет 161–165 °С. Испытания ряда материалов электроизоляционного назначения на основе эпоксидно-полиарилатных композиций подтвердили их пригодность для длительной эксплуатации при температуре выше 155 °С.

При взаимодействии эпоксидного олигомера с полиарилатом в открытом объёме часть воды испаряется. Количество испаряющейся и вступающей в реакцию воды зависит от содержания воды, введённой в эпоксидно-полиарилатную композицию. Поэтому в исходную смесь высокодисперсного порошка полиарилата и эпоксидного олигомера вводят несколько

Таблица 1

## Свойства эпоксидно-полиарилатных композиционных материалов

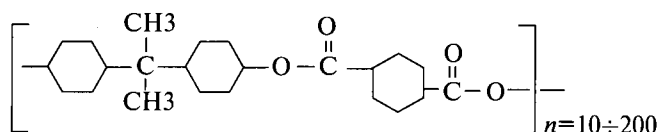
Материал	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Электрическая прочность, МВ/м	Удельное объёмное электрическое сопротивление $10^{-13}$ , Ом·м
Эпоксидно-полиарилатный компаунд	40–70	14–20	60–100* 35–45**	10–100
Синтетическая бумага:				
– полиарилатная	10–20	8–10	13–18	2
– эпоксидно-полиарилатная	35–65	8–20	25–100	3–5
– полиамидная	50–60	10–12	23–30	5
– эпоксидно-полиарилатполиамидная	40–60	4–10	35–80	1–2
– слюдоволокнистая	60–70	3–5	10–15	2
– эпоксиполиарилат-слюдоволокнистая	60–75	5–8	40–60	2–3
Многослойные материалы:				
– исходная полиарилатная плёнка***	50–75	2–20	100	0,1
– сваренные полиарилатные плёнки	50–125	10–70	60–120	2–8
ПЭТФ-плёнка + эпоксиполиарилат	60–120	30–90	50–95	6
ПЭТФ-плёнка + эпоксиполиарилатная плёнка	70–160	40–110	60–140	8
ПЭТФ-плёнка + эпоксиполиарилатная бумага	60–140	35–100	55–115	2
ПЭТФ-плёнка + эпоксиполиарилат-слюдоволокнистая бумага	60–120	40–80	50–90	1–2

\* Толщина образца 0,1 мм.  
 \*\* Толщина образца 3–5 мм.  
 \*\*\* Толщина исходной полиарилатной плёнки 0,02–0,1 мм, сваренных полиарилатных плёнок 0,05–3 мм, многослойных материалов на основе ПЭТФ-плёнки 0,1–0,5 мм.

большее количество воды для получения литьевой композиции оптимального состава.

Композиции с большим содержанием эпоксидного олигомера, чем полиарилата, полученные без добавления воды, имеют меньшую вязкость и остаются в термопластичном состоянии, тогда как композиции с большим количеством полиарилата обладают более высокой вязкостью и содержат непрореагировавший полиарилат. Введение воды не только ускоряет реакцию, особенно в композициях с большим содержанием эпоксидного олигомера, но и способствует дополнительному гидролизу эпоксидных групп и отверждению композиции. Однако композиция с соотношением компонентов, близким к эквимольному, имеет более сшитую, жёсткую структуру реактопласта, пригодного для применения в качестве электроизоляционного материала.

Так, была разработана электроизоляционная композиция, обладающая высокими значениями химической и гидролитической стойкости, а также высокими электроизоляционными характеристиками. Композиция содержит эпоксидно-диановую смолу и наполнитель – полиарилат следующей формулы:



Благодаря использованию полиарилата в композиции с эпоксидной смолой происходит химическая сшивка молекул полимера, приводящая к улучшению физико-механических, электрических и химических свойств готового материала.

При создании многослойных композиционных материалов электроизоляционного и конструкционного назначения применяются плёнки из полиарилатов, которые могут быть легко склеены любой эпоксидной смолой без отвердителя. Это позволяет повысить качество материалов и упростить процесс изготовления. Возможности тепловой сварки этих материалов ограничены высокой температурой плавления полиарилатов, которая совпадает с температурой их деструкции.

Реакция взаимодействия эпоксидного цикла со сложноэфирной группой протекает с высокой скоростью при температуре выше 200 °С. При более низких температурах реакция эпоксидно-дианового олигомера с полиарилатом может протекать по другому механизму с участием гидроксилсодержащих соединений, в том числе и влаги, содержащейся в воздухе. В этом случае образуются гидролизованные продукты полиарилата, которые затем взаимодействуют с эпоксидной группой.

Изменение физико-механических свойств смеси эпоксидно-дианового олигомера с полиарилатом в зависимости от соотношения их содержания и степени превращения реагирующих функциональных групп изучено меньше, чем механизм реакции. Экспериментально установлено, что при содержании олигомера ЭД-22 в смеси с полиарилатом менее 30% или более 70% конечный продукт находится в термопластичном состоянии и его температура текучести ниже, чем у полиарилата. С увеличением степени превращения температура текучести конечного продукта возрастает. В процессе химической сварки структура сварного шва постоянно изменяется. Введение в область контакта свариваемых слоёв полиарилата различного количества эпоксидного олигомера и варьирование температуры сварки позволяет изменять степень превращения реакционно-способной смеси, образующей сварной шов.

Зная кинетику протекания реакции и термомеханические характеристики эпоксидно-полиарилатных составов, можно выбрать температуру сварки и количество реагента на соединяемых поверхностях материалов из полиарилатов в зависимости от требуемой структуры сварного шва. Тип структуры шва влияет на работоспособность полученных материалов и, как следствие, на их прочность при нагружении вдоль или перпендикулярно поверхности контакта. Большое значение при создании многослойных электроизоляционных материалов на основе полимерных плёнок имеет пра-

вильный выбор сочетания прочности при растяжении и расслоении, особенно для механизированных процессов изолирования, когда материал подвергается механическим нагрузкам как в продольном, так и в перпендикулярном к плоскости материала направлениях.

Таким образом, работоспособность сварного соединения полимерных материалов, изготовленных с использованием присадочных реагентов, определяется структурой сварного шва, которая в свою очередь зависит от технологических параметров химической сварки — содержания реагента и температуры сварки.

Синтетические бумаги, содержащие волокнистые компоненты из полиарилатов в контакте с эпоксидной смолой без отвердителя, после их пропитки и нагревания, дают механически и электрически прочные композиционные материалы, способные быть использованными в качестве электроизоляционных материалов низковольтного оборудования [3].

Данные, полученные для эпоксидно-полиарилатных композиций с неодинаковым содержанием компонентов, справедливы и для других композиционных материалов, в которых полиарилаты используются в виде волокнистых связующих и плёнок. В этом случае предполагается, что количество полиарилата превышает содержание эпоксидного олигомера. При этом полиарилат, участвуя в реакции частично, выполняет функцию наполнителя. Часть полиарилата, участвующая в реакции с эпоксидным олигомером, образует эпоксидно-полиарилатную композицию с оптимальными свойствами и играет роль связующего. К таким материалам можно отнести модифицированную синтетическую бумагу на основе полиарилатного связующего. После пропитки бумаги эпоксидным олигомером и отверждения значительно повышаются физико-механические и электрические характеристики композиционных материалов с оптимальным соотношением эпоксидного олигомера и полиарилата. Такая модифицированная бумага может быть рекомендована для применения в качестве материала электроизоляционного назначения. Улучшение свойств бумаги достигается благодаря тому, что вводимый из раствора в ацетоне низковязкий эпоксидный олигомер ЭД-22 смачивает волокнистые компоненты бумаги. При нагреве вязкость олигомера, взаимодействующего с полиарилатом, возрастает, обеспечивая заданные физико-механические, электрические и другие свойства эпоксидно-полиарилатного связующего. В неот-

Таблица 2

## Физико-механические характеристики слюдяных бумаг

Характеристики	Состав		
	1	2	3
Электрическая прочность, кВ/мм: – в исходном состоянии – после пребывания в течение 48 ч в атмосфере с 95±3% относительной влажности	58 52	51 46	45 41
Разрушающее напряжение при растяжении, кГс/см <sup>2</sup> : – в исходном состоянии – после пребывания в течение 48 ч в атмосфере с 95±3% относительной влажности	670 610	690 615	730 650
Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·см: – в исходном состоянии – после пребывания в течение 48 ч в атмосфере с 95±3% относительной влажности	3·10 <sup>15</sup> 4·10 <sup>14</sup>	2,5·10 <sup>15</sup> 3·10 <sup>14</sup>	1,5·10 <sup>15</sup> 2,5·10 <sup>14</sup>
Водопоглощение после пребывания в воде в течение 48 ч, %	2,0	3,0	3,2

верждённом состоянии связующее обладает низкой липкостью, что позволяет формовать из бумаги различные изделия, которые после отверждения сохраняют форму с необходимым комплексом свойств.

Например, разработана термостойкая электроизоляционная бумага, содержащая термостойкое синтетическое волокно, эпоксиарилатное связующее и фибриды жирно-ароматических и (или) алифатических непредельных полиамидов. Применение эпоксиарилата в составе связующего позволяет сохранить на высоком уровне механическую и электрическую прочность бумаги.

Следует отметить, что использование полиарилатов в электротехнике в качестве компонент изоляционных систем можно считать перспективным из-за их стойкости к частичным разрядам и дугостойкости. Известны случаи нанесения тонкого слоя (2–3 мкм) полиарилатов на поверхность полиэтилентерефталатных плёнок для межслойной изоляции высоковольтных трансформаторов.

Для высоковольтных систем разработаны слюдосодержащие бумаги с волокнистым наполнителем. В качестве волокнистого материала были использованы фибриды на основе полиарилатов. Физико-механические характеристики полученных слюдяных бумаг, в зависимости от содержания полиарилатов, приведены в табл. 2

На основе разработанных бумаг могут быть изготовлены композиционные материалы как с плёнками, так и без, для изоляции электри-

ческих машин и аппаратов, в том числе высоковольтных.

## Список литературы

1. Пак В.М., Трубачев С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. 2007.
2. Гринь Е.Л., Сафонов Г.П., Каплунов И.Я. и др. Получение и свойства эпоксидно-полиарилатных композиций // Пластические массы. 1988. №6.
3. Гринь Е.Л., Губерман Ф.И., Сафонов Г.П. и др. Сварка материалов из полиарилатов с помощью эпоксидных олигомеров // Пластические массы. 1987. №5.

**Пак Владимир Моисеевич** – работал главным специалистом по электроизоляционным материалам в ОАО «Холдинговая компания Элинар», доктор техн.наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Усовершенствование изоляции крупных электрических машин» в 2000 г.

**Сафонов Георгий Петрович** – заместитель начальника службы технологического обеспечения НПП ВНИИЭМ, канд.физ.-мат.наук. Окончил Московский физико-технический институт в 1963 г. по специальности «молекулярная и химическая физика». Защитил диссертацию по специальности «электроизоляционная и кабельная техника» в 1967 г.

**Папков Андрей Владимирович** – заместитель генерального директора по техническому развитию ОАО «Холдинговая компания Элинар», канд. техн.наук. Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г. Защитил диссертацию в МИТХТ по специальности «Химическая технология основного органического синтеза» в 1991 г.

**Воробьёв Павел Викторович** – начальник лаборатории электроизоляционных материалов НПП ВНИИЭМ. Окончил Московский государственный университет приборостроения и информатики.

# Разработка пазовой изоляции роторов турбогенераторов с повышенными электрофизическими и механическими характеристиками

МЕЛЬНИЧЕНКО А.П., ПАПКОВ А.В., ПАК В.М.

Приведена номенклатура пазовых коробок роторов турбогенераторов, выпускаемых ОАО «Холдинговая компания Элинар». Представлены результаты сравнительных испытаний, показаны преимущества новых видов пазовых коробок.

**Ключевые слова:** электроизоляционные материалы, пазовые коробки, турбогенераторы, электрическая прочность.

С освоением производства турбогенераторов большой мощности с воздушным охлаждением, выгодно отличающихся от турбогенераторов с системами охлаждения на основе воды и водорода простотой конструкции и обслуживания, приемлемыми энергетическими показателями и габаритами, требования к электроизоляционным материалам значительно возрастают.

Несмотря на невысокие напряжения обмотки ротора (от 100 до 700 В), изоляционные элементы, находящиеся в пазу ротора, должны обладать высокой надёжностью и способностью сохранять электроизоляционные свойства при воздействии повышенных температур и больших механических напряжений, достигающих 90 МПа, а в аномальных режимах — 200 МПа. Большое значение имеет также коэффициент теплопроводности изоляции, который определяет условия теплопередачи, а значит, и уровень тепловых нагрузок, которым подвергается изоляция.

Все эти факторы учитывались при разработке и освоении производства пазовых коробок специалистами ОАО «ХК Элинар». Оптимальной была принята многослойная конструкция, состоящая из стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим веществом, и арамидной бумаги. Такие пазовые коробки выпускаются длительное время под маркой КПТБ.

## Свойства пазовых коробок марки КПТБ

Электрическая прочность, кВ/мм . . . . . 20–25  
Объёмное электрическое сопротивление при 15 – 35 °С, Ом·см . . . . .  $10^{13}$   
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, МПа. . . . . 270–350

Wide range of slot armors for rotors of turbogenerators manufacturing at OAO Elinar Holding Company is represented in the report. Main results of comparative tests are given, advantages of new kinds of slot armors are shown.

**Key words:** electrical insulating materials, slot armors, turbogenerators, electric strength.

Теплопроводность, Вт/м·К . . . . . 0,25–0,30  
Усадка, % . . . . . 0,05–0,15  
Класс нагревостойкости . . . . . F – H

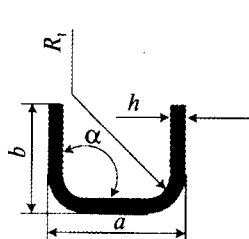
Анализ физико-механических характеристик пазовых коробок показывает, что система изоляции на основе арамидной бумаги и стеклоткани обладает не только высокой электрической, но и механической прочностью, имеет значительно больший коэффициент теплопроводности по сравнению с традиционно применяемыми материалами. Поэтому в настоящее время пазовые коробки марки КПТБ нашли широкое применение практически для всех типов турбогенераторов выпускаемых отечественными энергомашиностроительными предприятиями.

Конструктивно пазовые коробки могут иметь различную форму и представлять собой, например L-, S- или U-образные профили. За последние годы ХК «Элинар» накопила широкий ассортимент технологической оснастки, который позволяет удовлетворять практически любые требования в части геометрических размеров пазовых коробок (табл. 1).

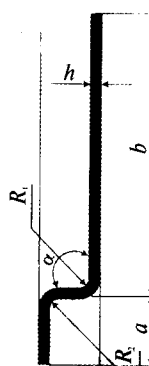
Несмотря на высокий достигнутый уровень показателей, производители турбогенераторов выдвигают более высокие требования к пазовой изоляции роторов, причём, как правило, эти требования носят специфический характер. Одним из основных требований является повышение электрической прочности изоляции для обеспечения возможности применения утончённой изоляции толщиной менее 1 мм. Кроме того, выдвигаются такие требования, как стойкость к ударным нагрузкам (Impact resistance) или сопротивление к продавливанию металлического шарика (Ball on cavity test), имитирующие те воздействия, ко-

торые могут возникнуть как в процессе монтажа элементов конструкции ротора турбогенератора, так и в процессе его эксплуатации.

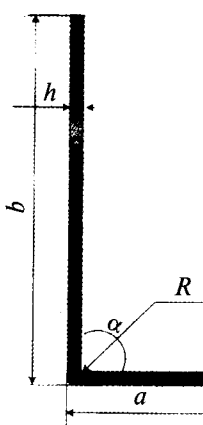
Таблица 1



$\alpha$ , град	90–94
$b$ (max), мм	250
$a$ , мм	20–50
$h$ , мм	1,0–4,0
$R_1$ , мм	0,5–5,0
Длина (max), мм	> 8000



$\alpha$ , град	90–94
$a$ (max), мм	20
$b$ (max), мм	150
$h$ , мм	1,0–2,0
$l$ , мм	4–8
$R_1$ , мм	0,5–4,0
$R_2$ , мм	0,5–4,0
Длина (max), мм	12000



$\alpha$ , град	90–94
$a$ (max), мм	40
$b$ (max), мм	165
$h$ , мм	0,8–2,0
$R$ , мм	1,0–14,0
Длина (max), мм	12000

Результаты испытаний показали, что пазовые коробки марки КПТБ не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям и не могут гарантировать сохранение параметров на заданном уровне.

В связи с этим специалистами «ХК Элинар» были проведены работы по оптимизации композиционного состава пазовых коробок. Было показано, что в структуру пазовой коробки необходимо включить специальные материалы, которые позволят обеспечить более высокие электрические характеристики, а главное – сохранить высокую механическую стойкость при воздействии разрушающих сил. При этом необходимый результат может быть

достигнут только при условии достижения высокой межслоевой адгезии. Этого удалось достичь за счёт специальных методов обработки поверхностей исходных компонентов, следствием чего явилось образование химически активных центров на поверхности материалов.

Новая конструкция позволила минимизировать вредное воздействие внутренних напряжений, которые, несомненно, возникают в процессе различных механических воздействий на пазовую коробку. Пазовым коробкам, изготовленным по новой технологии и с применением новых материалов, присвоено условное обозначение КПТБП. В табл. 2 приведены сравнительные данные результатов испытаний пазовых коробок.

Таблица 2

Показатель	КПТБ	КПТБП
Электрическая прочность, кВ/мм	15–25	20–30
Электрическая прочность после продавливания металлического шарика, кВ/мм	10–15	15–20
Электрическая прочность после воздействия ударной нагрузки, кВ/мм	12–16	16–24
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, МПа	270–350	290–360
Класс нагревостойкости	F–H	F–H

Анализ приведённых результатов показывает, что проведённые работы позволили увеличить как электрические характеристики пазовых коробок в исходном состоянии, так и электрическую прочность после воздействия разрушающих механических напряжений. Температурные испытания подтвердили класс нагревостойкости H (180 °C) новых пазовых коробок.

**Мельниченко Александр Павлович** – начальник технического отдела ОАО «Холдинговая компания «Элинар». Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г.

**Папков Андрей Владимирович** – заместитель генерального директора по техническому развитию ОАО «Холдинговая компания Элинар», канд. техн. наук. Окончил Московский институт тонкой химической технологии (МИТХТ) в 1984 г. Защитил диссертацию в МИТХТ по специальности «Химическая технология основного органического синтеза» в 1991 г.

**Пак Владимир Моисеевич** – работал главным специалистом по электроизоляционным материалам в ОАО «Холдинговая компания Элинар», доктор техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Усовершенствование изоляции крупных электрических машин» в 2000 г.

# Совершенствование методики проведения испытаний изоляторов в условиях загрязнения и увлажнения

ГОДУЛЯН В.В., МИЛКИН Е.А., ТРИФОНОВ В.З.

*Выполнена оценка влияния момента измерения удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения на её значение. Показано, что значение удельной поверхностной проводимости в первый и последующие периоды напряжения промышленной частоты могут существенно различаться. Предложена методика проведения измерения удельной поверхностной проводимости при испытании внешней изоляции в условиях загрязнения и увлажнения.*

**Ключевые слова:** загрязнённая изоляция, удельная поверхностная проводимость, методика измерения.

В процессе эксплуатации внешняя изоляция (как линейная, так и подстанционная) подвергается воздействию внешних факторов, в числе которых существенную роль играет загрязнение поверхности изоляторов. В сухом состоянии слой загрязнения практически не влияет на электрические характеристики внешней изоляции, однако при увлажнении изоляции (дождь, роса, туман), становится проводящим. При протекании тока утечки по загрязнённому и увлажнённому слою происходит разогревание этого слоя и испарение влаги. На поверхности изолятора (как правило, в местах с большей плотностью тока) вследствие испарения образуется сухой участок поверхности изолятора. Остальная его часть остаётся проводящей, и напряжение на образовавшемся сухом пояске может оказаться достаточным, чтобы перекрыть подсушенный участок. В месте соприкосновения частичной дуги и проводящего слоя плотность тока увеличивается, что способствует более интенсивному испарению влаги в опорных точках дужки, а следовательно, и удлинению частичной дуги. При этом часть поверхности изолятора остаётся шунтированной высокоионизированным плазменным каналом. При устойчивом развитии последнего происходит полное перекрытие изолятора.

В зависимости от соответствующих условий среды удельная поверхностная проводимость загрязнённой внешней изоляции может меняться в широких пределах — от единиц до десятков микросименсов.

*The estimation of influence of the moment of measurement of specific layer conductivity on its value is executed. It is shown, that value of specific layer conductivity at the first and the subsequent periods of a alternating voltage can differ essentially. The advanced technique of measurement of specific layer conductivity is offered at test of external isolation under pollution conditions.*

**Key words:** pollution insulation, reference layer conductivity, measuring method.

Испытания в условиях загрязнения и увлажнения изоляции проводятся в соответствии с ГОСТ Р 52082-2003; ГОСТ Р 52034-2008; ГОСТ 28856-90. Методика проведения испытаний соответствует ГОСТ 10390-90.

Для проведения испытаний на современном уровне была разработана специальная измерительная система, состоящая из цифрового запоминающего осциллографа с большим диапазоном памяти, персонального компьютера, программного обеспечения «МЕУА\_G\_3», позволяющая непрерывно регистрировать испытательное напряжение и ток длительностью до 65 с, а также строить график зависимости удельной поверхностной проводимости от времени.

Испытательная схема содержит соединительные шины подвода потенциала к объекту испытаний. Слой проводимости имеет длину, равную длине пути утечки изолятора. Контур заземления также имеет некоторую индуктивность, что приводит к наличию индуктивности в испытательной схеме, а значит к смещению тока утечки относительно испытательного напряжения. Данным смещением можно пренебречь при определении проводимости в точках экстремума синусоиды. В точках экстремумов напряжения и тока (когда отношение шума к реальному сигналу минимально) ошибка определения удельной поверхностной проводимости сводится к минимуму.

ГОСТ 10390-90 регламентирует измерение удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения перед подачей испытательного

напряжения на объект испытаний путём приложения пониженного напряжения (5 кВ на 1 м длины пути утечки). Представляет интерес сопоставить результаты измерений удельной поверхностной проводимости при подаче пониженного напряжения и при подаче испытательного напряжения. В табл. 1 приведены результаты измерений удельной поверхностной проводимости в зависимости от значения подаваемого на объект напряжения. Как видно из результатов исследований, измеренная удельная поверхностная проводимость на пониженном напряжении несколько ниже (до 15%) проводимости при измерении после подачи испытательного напряжения на объект. Эта разница вызвана тепловыми процессами в слое загрязнения при испытательном напряжении, что соответствует реальным условиям в процессе эксплуатации. Поэтому целесообразно измерять удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения при подаче испытательного напряжения на объект испытаний.

ГОСТ 10390-90 регламентирует измерения проводимости в течение 0,1 с (10 полупериодов напряжения промышленной частоты) после приложения напряжения толчком к объекту испытаний (до начала подсушки поверхности и интенсивного образования на ней частичных дуг). Также представляет интерес определить, как за данный промежуток времени изменяется проводимость в слое загрязнения при различной удельной поверхностной проводимости.

На рис. 1 показан результат испытаний линейного полимерного изолятора ЛК 70/110 УХЛ1 при низкой (5–10 мкСм) удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения. Приведена характерная осциллограмма напряжения и тока для первых 10 полупериодов напряжения промышленной частоты и соответствующая им удельная поверхностная проводимость. Видно, что удельная поверхностная проводимость меняется на 5,8% к второму полупериоду относительно первого ( $\chi_I = 7,7$  мкСм;  $\chi_{II} = 8,15$  мкСм) и на 20,5% к десятому полупериоду относительно первого полупериода ( $\chi_X = 9,28$  мкСм).

На рис. 2 показан результат испытаний линейного полимерного изолятора ЛК 70/110 УХЛ1 при высокой (45–65 мкСм) удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения. Видно, что удельная поверхностная проводимость меняется на 10,0% к второму полупериоду относительно первого ( $\chi_I = 44,34$  мкСм;  $\chi_{II} = 48,79$  мкСм) и на 48,7% к десятому полупериоду относительно первого полупериода ( $\chi_X = 65,95$  мкСм). Сопоставление данных рис. 2 и данных, полученных с помощью высокоскоростной камеры, показало, что образование частичных дужек начинается в данном опыте уже на девятом полупериоде напряжения промышленной частоты. Это приводит к перекрытию части поверхности изолятора, шунтируя тем самым часть поверхности частичными дужками, и появлению ярко выраженной нелинейной вольт-амперной характе-

Таблица 1

Зависимость удельной поверхностной проводимости от приложенного напряжения

20 кВ		50 кВ		70 кВ		80 кВ		90 кВ		100 кВ	
III полупериод напряжения, мкСм	III полупериод напряжения <sup>1</sup> , мкСм	III полупериод напряжения, мкСм	Отклонение относительно испытания пониженным напряжением, %	III полупериод напряжения, мкСм	Отклонение относительно испытания пониженным напряжением, %	III полупериод напряжения, мкСм	Отклонение относительно испытания пониженным напряжением, %	III полупериод напряжения, мкСм	Отклонение относительно испытания пониженным напряжением, %	III полупериод напряжения, мкСм	Отклонение относительно испытания пониженным напряжением, %
3,50	—	—	—	—	—	3,90	10,26	—	—	—	—
4,80	4,40	—	—	—	—	4,80	0,00	—	—	—	—
—	4,70	—	—	—	—	5,00	6,00	—	—	—	—
—	4,80	—	—	4,90	2,04	—	—	5,20	7,69	—	—
6,30	6,00	—	—	5,70	10,53	—	—	5,80	8,62	—	—
11,60	11,90	—	—	13,20	12,12	13,50	14,07	—	—	—	—
14,00	15,50	16,30	14,11	15,40	9,09	—	—	—	—	—	—
24,30	24,00	23,00	5,65	—	—	—	—	—	—	—	—

<sup>1</sup> Испытание пониженным напряжением



ристики. Таким образом, измерение удельной поверхностной проводимости в данном полупериоде неизбежно приведёт к неправильным оценкам физического параметра.

Полученные данные свидетельствуют, что даже при использовании одной и той же методики испытаний экспериментальные данные в пределах 0,1 с могут характеризоваться значительным разбросом.

На рис. 3 и 4 показано изменение ВАХ в зависимости от номера полупериода для первой четверти после подачи напряжения толчком при испытании линейного полимерного изолятора ЛК 70/110 УХЛ1 для низкой и высокой удельной поверхностной проводимости соответственно. ВАХ нелинейна, меняясь от полупериода к полупериоду за счёт разогрева слоя загрязнения, а ток утечки имеет несинусоидальный характер. Поскольку с ростом удельной поверхностной проводимости растёт плотность тока, протекающего в слое, тепловые процессы протекают более интенсивно, увеличивая «нелинейность» ВАХ.

В табл. 2 показана зависимость удельной поверхностной проводимости от номера полупериода (для I-, II-, III- и X-го полупериодов) для различных типов изоляторов, а также про-

центное увеличение проводимости относительно первого полупериода: 1–6 – линейные изоляторы класса напряжения 110 кВ; 7,8 – опорный изолятор класса напряжения 220 кВ; 9,10 – опорный изолятор класса напряжения 110 кВ.

Как видно из рис. 5, переходным процессом можно пренебречь уже в III-м полупериоде, однако постоянная времени зависит не только от параметров испытательного оборудования, но и от сопротивления слоя загрязнения, что приводит к различным постоянным времени даже при испытаниях одного и того же объекта. Однако, исходя из опыта, можно сделать вывод о том, что в III-м (чаще – во II-м) полупериоде переходным процессом можно пренебречь.

Таким образом, наиболее стабильные результаты получены при III-м полупериоде напряжения. Поэтому измерение проводимости следует:

- проводить в III-м синусоидальном полупериоде напряжения;
- осуществлять в точках экстремума, поскольку в каждом полупериоде проводимость максимальна именно в этих точках.

Таблица 2

Зависимость удельной поверхностной проводимости от номера полупериода для различных типов изоляторов и увеличение проводимости относительно первого полупериода

№	Изолятор	Удельная поверхностная проводимость, мкСм (%) (относительно первого полупериода)			
		I	II	III	X
1	ЛК 70/110 УХЛ1 ( $k_{\Phi}=25$ )(низкая проводимость)	7,7	8,2 (6,3)	8,6 (11,7)	9,3 (20,5)
2	ЛК 70/110 УХЛ1 ( $k_{\Phi}=25$ )(высокая проводимость)	44,3	48,6 (9,7)	49,6 (12,0)	66,0 (48,7)
3	ISI-CAN ( $k_{\Phi}=14,7$ )	12,3	13,6 (11,0)	14,3 (16,3)	16,3 (33,0)
4	ISI-PAN ( $k_{\Phi}=15,3$ )	11,0	11,7 (5,7)	12,9 (17,3)	15,6 (41,3)
5	ISI-ROK ( $k_{\Phi}=16,3$ )	12,4	13,6 (9,8)	14,2 (14,5)	15,3 (23,1)
6	ISI-TWA ( $k_{\Phi}=17,4$ )	9,6	10,3 (7,5)	10,6 (10,6)	12,0 (25,0)
7	С8-1050 1-М УХЛ, Т1 ( $k_{\Phi}=4,8$ ) (низкая проводимость)	9,1	9,6 (5,5)	10,0 (9,9)	11,0 (20,9)
8	С8-1050 1-М УХЛ, Т1 ( $k_{\Phi}=4,8$ ) (высокая проводимость)	12,9	13,4 (3,9)	13,7 (6,2)	14,5 (12,4)
9	ИОС-110/400 ( $k_{\Phi}=3,8$ ) (низкая проводимость)	7,9	8,2 (3,8)	8,5 (7,6)	9,3 (17,7)
10	ИОС-110/400 ( $k_{\Phi}=3,8$ ) (высокая проводимость)	11,5	12,0 (4,3)	12,3 (7,0)	13,4 (16,5)

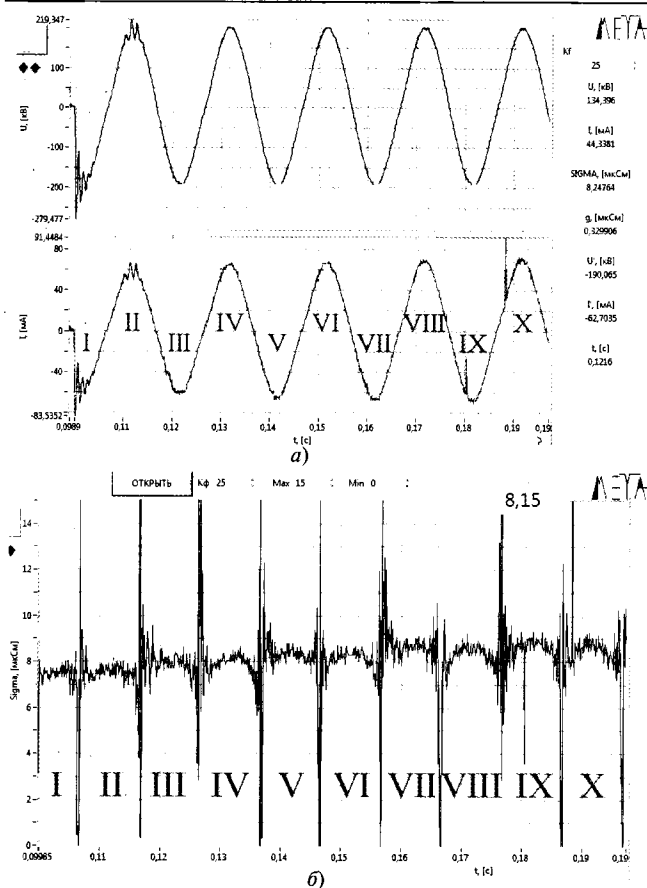


Рис. 1. Характерная осциллограмма первых 10 полупериодов испытательного напряжения и тока (а) после подачи напряжения толчком на объект испытаний (линейный полимерный изолятор ЛК 70/110 УХЛ1) при **низкой** (5–10 мкСм) проводимости и график зависимости удельной поверхностной проводимости (б) от времени для первых 10 полупериодов испытательного напряжения и тока

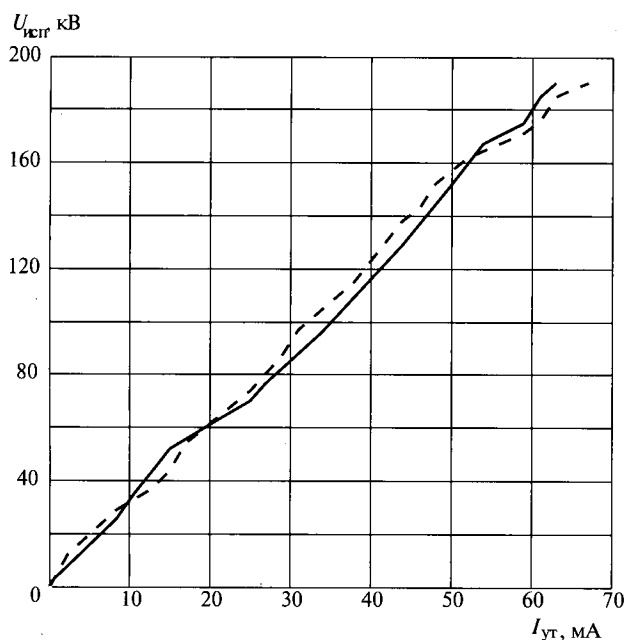


Рис. 3. ВАХ слоя загрязнения с **низкой** (5–10 мкСм) проводимостью в зависимости от номера полупериода для первой четверти после подачи напряжения промышленной частоты толчком: — III-й полупериод; ---- V-й полупериод

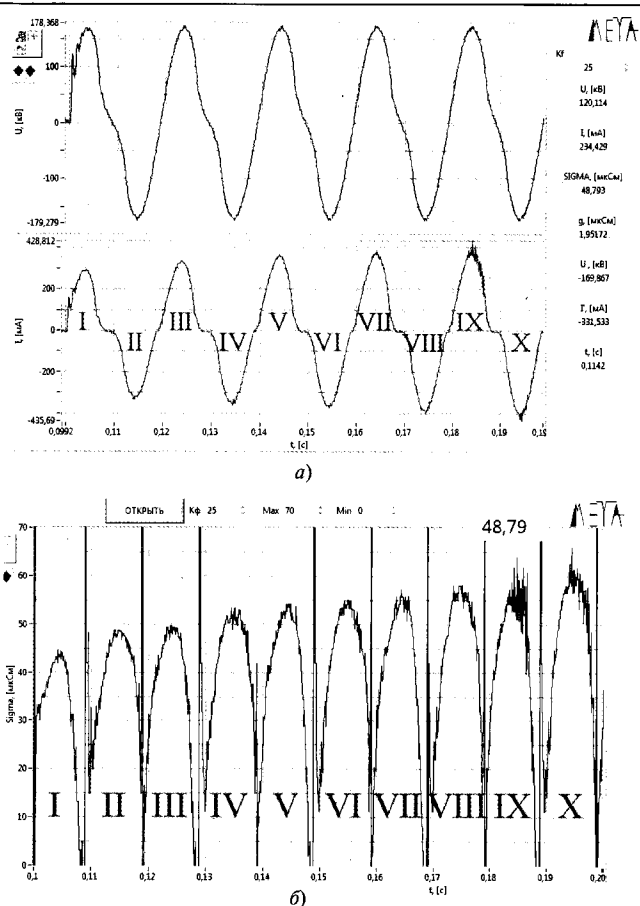


Рис. 2. Характерная осциллограмма первых 10 полупериодов испытательного напряжения и тока (а) после подачи напряжения толчком на объект испытаний (линейный полимерный изолятор ЛК 70/110 УХЛ1) при **высокой** (45–65 мкСм) проводимости и график зависимости удельной поверхностной проводимости (б) от времени для первых 10 полупериодов испытательного напряжения и тока

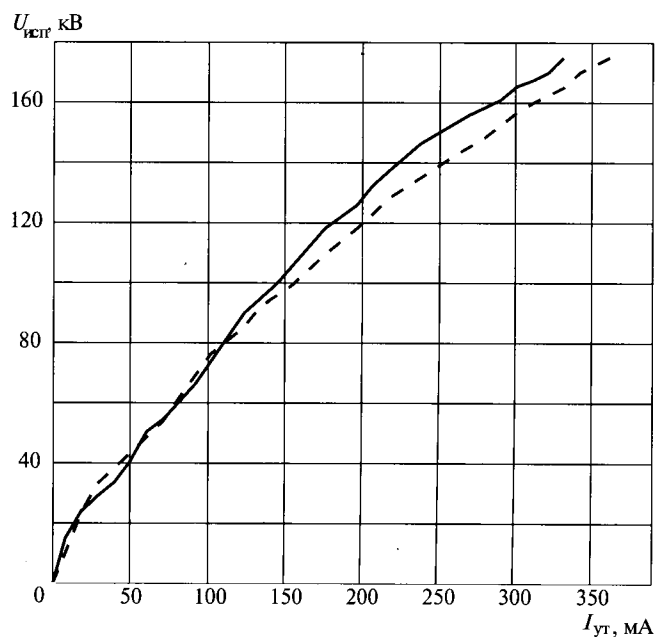


Рис. 4. ВАХ слоя загрязнения с **высокой** (45–65 мкСм) проводимостью в зависимости от номера полупериода для первой четверти после подачи напряжения промышленной частоты толчком: — II-й полупериод; ---- IV-й полупериод

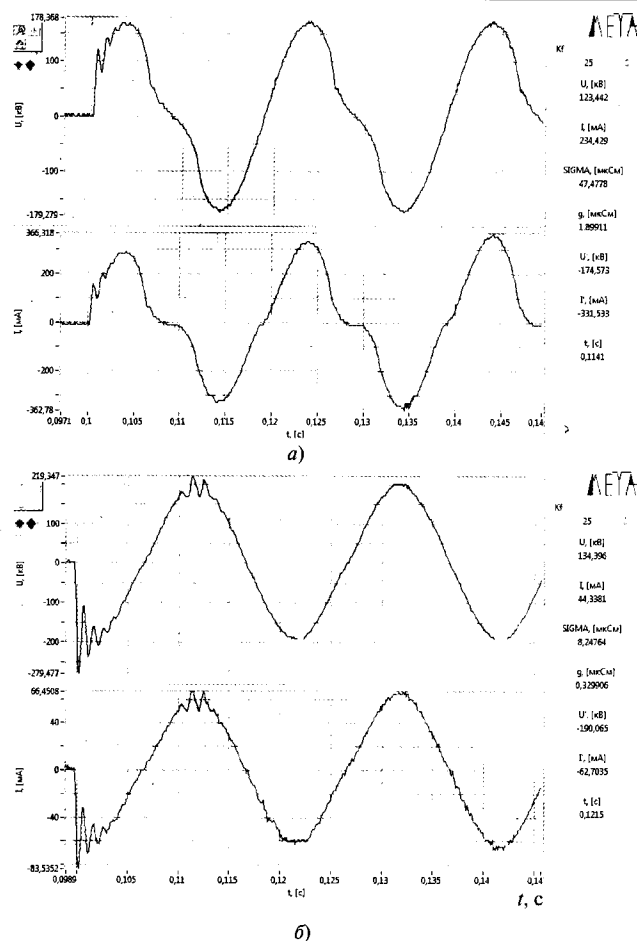


Рис. 5. Переходный процесс при подаче напряжения толчком на объект испытаний при испытаниях в условиях загрязнения и увлажнения изоляции при высокой (а) и низкой (б) проводимости слоя

Следовательно, к средствам измерения проводимости в слое загрязнения должны предъявляться очень жёсткие требования. Среди прочих — малая инерционность, большое время записи (до 1 мин), а также устойчивость к электромагнитным помехам при перекрытии изоляции и переходе разряда в устойчивую дуговую стадию.

Современные методы сбора и анализа полученных результатов испытаний позволяют ре-

шить данный спектр проблем, что, в конечном счете, позволит усовершенствовать методику проведения испытаний.

Удельная поверхностная проводимость

$$\gamma = k_{\phi} i_{\text{ут}} / u_{\text{исп}},$$

где  $k_{\phi}$  — коэффициент формы;  $i_{\text{ут}}$  — ток утечки;  $u_{\text{исп}}$  — испытательное напряжение.

Таким образом, на основании полученных данных представляется целесообразным ввести соответствующие поправки в существующие нормативные документы, регламентирующие методы измерения удельной поверхностной проводимости при испытаниях изоляции в условиях загрязнения и увлажнения с обязательным осциллографированием токов утечки и испытательного напряжения.

Измерение проводимости необходимо осуществлять в III-м полупериоде синусоиды после подачи испытательного напряжения «толчком» в точках экстремума.

### Список литературы

1. Мерхалев С.Д., Соломник Е.А. Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой Л.: Энергия, 1973. С. 160.
2. ГОСТ 10390-86. Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытания внешней изоляции в загрязненном состоянии.
3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / Пер. с нем. М.: Энергия, 1983. С. 232.
4. Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В., Папуловский В.Ф. LabVIEW: практикум по основам измерительных технологий: Учебное пособие для вузов. М.: ДМК Пресс, 2005.

Годулян Виктор Васильевич — начальник сектора ФГУП ВЭИ, канд. техн. наук. Окончил МЭИ в 1967 г. Защитил диссертацию по теме «Разработка внешней изоляции электрооборудования постоянного тока в условиях загрязнения и увлажнения» в 1979 г.

Милкин Евгений Александрович — инженер ФГУП ВЭИ. Окончил Московский государственный вечерний металлургический институт в 2010 г. Аспирант ФГУП ВЭИ.

Трифонов Виталий Зиновьевич — начальник отдела ФГУП ВЭИ. Окончил МЭИ в 1970 г.

# **Анализ состояния поверхности электроизоляционных конструкций при воздействии осадков**

**РОДИОНОВ Н.Н.**

*Рассмотрен способ оценки влажности поверхности изоляторов во время воздействия дождя. Предложен способ повышения водоотталкивающих свойств (гидрофобности) поверхности. Выполнены испытания и получены положительные результаты.*

**Ключевые слова:** электроизоляционные конструкции, водоотталкивающие свойства, воздействие дождя.

Надёжность электроснабжения объектов — потребителей электроэнергии во многом зависит от состояния и полноценного функционирования изоляционных элементов электрических систем. Один из факторов, определяющих перекрытие электроизоляционных конструкций при воздействии дождя, связан с образованием на поверхности изолятора проводящей плёнки влаги. Подсушивание водной плёнки в естественных условиях приводит к возникновению частичных дуг. Значение тока утечки зависит от интенсивности дождя. На значение «мокроразрядного» напряжения существенно влияют характеристики дождя, количество влаги на поверхности изолятора: отдельные капли или сплошные участки водной плёнки. Эти явления рассмотрены многими исследователями и не требуют дополнительного подтверждения.

В настоящее время широко внедряются изоляторы наружной установки из полимерных материалов, а также конструкции, содержащие композиционные полимерные элементы (КПЭ), поверхность которых после определённого количества испытательных импульсов напряжения претерпевает изменения. Поверхность таких конструкций, к которым можно отнести, например ОПН, подвержена увлажнению и загрязнению во время эксплуатации, что приводит к увеличению токов утечки, протекающих по поверхностям КПЭ [1]. При испытаниях и эксплуатации изделий на высоких напряжениях на поверхности изоляционных элементов могут образовываться различные дефекты: оплавления, науглероженные следы и т. д. Это изменяет условия проведения экспериментов, особенно в начальной

*In the article the method of an estimation of humidify insulator's surface during influence of rain is considered. The way of increase of water repellency of a surface is offered. Tests are conducted and positive results are received.*

**Key words:** electrical-insulating construction, water repellency, influence of rain.

стадии создания конструкции, на этапе исследований.

Образование проводящей водяной плёнки на поверхности изолятора зависит от степени смачиваемости поверхности, определяемой гидрофобностью материала и характеризующейся краевым углом смачивания. Оценка состояния поверхности КПЭ (количество воды, загрязнений), степени её увлажнения во время воздействия дождя составляют определённую сложность, тем более, когда характеристики выпадения осадков изменчивы. Процесс таких исследований достаточно длителен, особенно если проводить испытания изоляторов непосредственно путём приложения импульсного напряжения. Испытания для различных видов напряжения (постоянного, переменного, разнообразных импульсов) включая стандартные импульсы (по ГОСТ), под воздействием искусственно создаваемого дождя с определёнными характеристиками, к которым относятся: интенсивность дождя и угол падения капель по отношению к изоляционной поверхности, весьма трудоёмки. В то же время информация о состоянии поверхности изоляторов особенно ценна в динамике при воздействии внешних факторов. С учётом разработки новых изоляционных КПЭ и специфики испытаний рассматриваемые вопросы являются весьма актуальными.

Целью работы являлись оценка состояния поверхности изоляционных конструкций, и в первую очередь её увлажнения, при воздействии внешних факторов, а также способов контроля состояния КПЭ в динамике, улучшение свойств поверхности электроизоляционных

конструкций и элементов для уменьшения водяных образований.

Для решения поставленной задачи был применён метод определения степени прохождения электромагнитной волны (ЭМВ) через изоляционное изделие. По изменению потерь энергии в диэлектрике, покрытом влагой и загрязнениями, можно судить о состоянии поверхности проектируемой изоляционной конструкции.

Предлагаемая методика отработывалась на композиционной диэлектрической мембране (ДКМ). Армирующим элементом являлась ткань на основе кварцевых волокон, в качестве связующего элемента в композиции использовался фторопласт. Данная композиция имеет лучшие диэлектрические показатели с точки зрения радиопрозрачности. Фторопласт относится к материалам с практически несмачиваемой поверхностью. Следует отметить, что каждый из этих компонентов обладает наивысшей стойкостью к атмосферным воздействиям, однако композиция (стеклопластик) имеет собственные характерные закономерности изменения параметров КПЭ при воздействиях внешних факторов. Информация по данному вопросу представлена в [2].

Несмотря на то, что поверхность исследуемого ДКМ образована фторопластовой плёнкой, входящей в состав фторопластовой лентки, из которой формовалась путём прессования ДКМ, и гидрофобность должна быть достаточно высокой, был проведён ряд исследований её качества. Было установлено, что поверхность является недостаточно гладкой из-за проступающей текстуры армирующей ткани и некоторых технологических дефектов в виде «игольчатых» проколов поверхностной плёнки фторопластовой лентки (поверхности ДКМ), которые были выявлены после экспозиции ДКМ в натуральных условиях в течение года.

Оценка неровностей с помощью профилометра дала следующие результаты. На «лицевой» стороне ДКМ среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a = 2,0$  мкм, а краевой угол смачивания  $\theta = 97,0^\circ$ . На «изнаночной» стороне ДКМ  $R_a = 6,0$  мкм, а  $\theta = 99,0^\circ$ . Такое, на первый взгляд, противоречивое влияние шероховатости поверхности на краевой угол смачивания объясняется следующим. Шероховатость влияет на гидрофобность и её характеристику, увеличивая краевой угол смачивания, если истинный угол превышает  $90^\circ$ , что имело место для поверхности фторопластовой лентки. Жидкость не

проникает в углубления и «плоская» поверхность образуется частично воздухом, к которому жидкость, практически, не имеет адгезии [3]. Поэтому фактический краевой угол смачивания поверхности фторопластовой лентки с имеющимися неровностями может быть менее  $97,0-99,0^\circ$ .

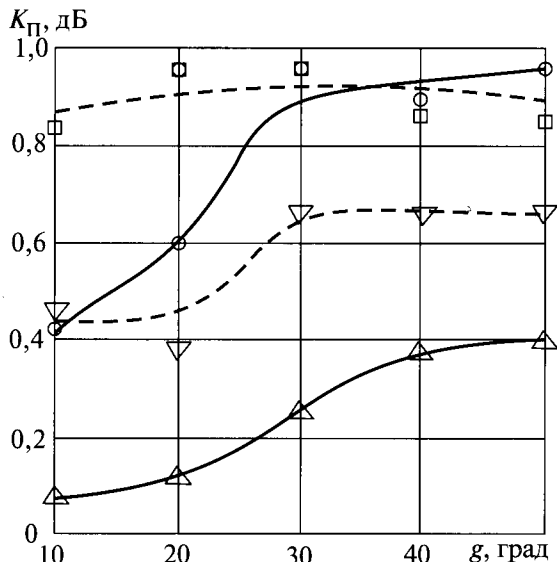
Для получения геометрически качественной (гладкой) поверхности и «залечивания» дефектов была сделана попытка приформовать на поверхность ДКМ полимерную плёнку. Поскольку фторопласт не сваривается и не склеивается ни с какими полимерами, требовалось подобрать специальное покрытие. В данной работе для создания более гладкой поверхности и повышения гидрофобности ДКМ на поверхность фторопластовой лентки напрессовывалась фторопластовая плёнка марки Ф-4МБ. Эта плёнка специально разработана для сварки фторопласта. При таком покрытии среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a = 0,5 \pm 0,6$  мкм, а краевой угол смачивания  $\theta = 108^\circ$ .

Для ДКМ с указанными характеристиками оценивались потери энергии ЭМВ в условиях дождя. Испытывались ДКМ с напрессованной плёнкой Ф-4МБ и без неё. Размер пластин ДКМ, подлежащих испытанию, составлял  $0,6 \times 0,6$  м. Измерения выполнялись на специальном стенде, на котором устанавливались испытываемые образцы ДКМ, крепилась поворотная рама с измерительной аппаратурой, располагалось дождевальное устройство. Контроль за количеством выпадаемых осадков проводился с помощью мерных стаканов и фиксирования интервалов времени.

Угол наклона падающих капель воды, имитирующей дождь, варьировался изменением наклона рамы с мембраной. Угол падения ЭМВ на испытываемую мембрану сохранялся постоянным за счёт вращения рамы с установленными на ней передающей и приёмной антеннами (рупорными). Точность установки углов рам находилась в пределах  $\pm 2^\circ$ . Измерительная частота ЭМВ, создаваемая генератором и излучаемая передающей антенной, составляла 37,5 ГГц. После прохождения ДКМ ЭМВ воспринималась приёмной антенной, и по разности уровней передаваемого и принимаемого сигнала оценивались потери в ДКМ, определялся коэффициент потерь  $K_{\Pi}$  в мембране, покрытой влагой.

Интенсивность падения капель  $\rho$  в дождевальной установке была выбрана 5 мм/мин, что соответствует максимальным интенсивно-

стям дождя различных климатических районов, в том числе и с тропическим климатом. Для оценки эффективности защитной плёнки мембраны были испытаны при большей интенсивности дождя  $\rho=10$  мм/мин. Результаты испытаний представлены на рисунке.



Зависимость потерь энергии электромагнитной волны в диэлектрической композиционной мембране при воздействии осадков. Поверхность ДКМ: ----- — без плёнки Ф-4МБ; — — с плёнкой Ф-4МБ; интенсивность дождя:  $\nabla$  — 5 мм/мин;  $\Delta$  — 10 мм/мин;  $\square$  — 5 мм/мин;  $\circ$  — 10 мм/мин

Согласно экспериментальным данным, при интенсивности дождя  $\rho=5$  мм/мин и углах падения дождя  $\gamma < 30^\circ$  потери в ДКМ с покрытием поверхности фторопластовой плёнкой на 0,30–0,40 дБ меньше, чем без плёнки, а при  $\gamma > 30^\circ$  потери меньше на 0,25 дБ. При  $\rho=10$  мм/мин потери в мембране с плёнкой также меньше на 0,30–0,40 дБ. Для  $\gamma \geq 30^\circ$  эффективность фторопластового покрытия не проявляется.

Время восстановления устойчивых показаний после прекращения дождя и стекания воды с поверхности ДКМ при  $\gamma=10 \div 40^\circ$  составляло 1–3 мин, а при  $\gamma=50^\circ$  — не превышало 15 мин для обоих видов мембран. На поверхности ДКМ без покрытия фторопластовой плёнкой влага после прекращения дождя сохранялась в большем количестве и  $K_p=0,10 \div 0,12$  дБ. Для ДКМ с фторопластовой плёнкой на поверхности, коэффициент потерь был существенно ниже:  $K_p=0,03 \div 0,08$  дБ, вода сохранялась в виде отдельных мелких капель. Поскольку реальные интенсивности дождей для различных климатических зон составляют  $\rho \approx 5$  мм/мин и менее, т.е.  $\rho=0,04 \div 0,50$  мм/мин [4], можно сделать вывод о значительной эффективности покрытия ДКМ фторопластовой

плёнкой марки Ф-4МБ и улучшении качества поверхности. В результате полученных данных установлено, что даже малая неоднородность (на уровне единиц микрон) высокогидрофобного материала существенно влияет на количество водных образований на поверхности ДКМ при воздействии осадков. Установлен диапазон интенсивностей дождя, при которых эффективно испытанное покрытие, что чётко видно на приведённых зависимостях (рисунок).

Поскольку при выпадении осадков, особенно с невысокой интенсивностью, вода образует весьма неоднородные слои, порой на ограниченных участках, нельзя аппроксимировать её количество через сплошную водяную плёнку какой-либо толщины, возможно лишь оценить интегральное количество влаги на изоляционной поверхности. Например, в ряде случаев вода на поверхности имела отдельные образования неопределённой формы, в некоторых случаях сохранялась в виде капель.

В случае покрытия ДКМ фторопластовой плёнкой гидрофобность более гладкой поверхности выше, чем у неровной поверхности фторлакоткани. Применённое покрытие позволило снизить потери в мембране с водяными образованиями и даже неоднородными слоями воды на поверхности в условиях дождя на 0,30–0,40 дБ, а следовательно, уменьшить количество влаги на поверхности КПЭ. Установленная закономерность существенна для электроизоляционных конструкций и элементов изделий, особенно для устройств, работающих при воздействии высокопотенциальных электрических полей в районах с интенсивными осадками и изменчивым климатом.

Представленный метод можно использовать для оценки состояния различных поверхностей КПЭ при динамическом воздействии атмосферных осадков и загрязнений. Измерения, проводимые на основе использования ЭМВ, позволяют существенно снизить трудоёмкость натурных экспериментов в высокопотенциальных полях, оценивая состояние поверхности разрабатываемого изделия, особенно в начальной стадии, при выполнении НИР и НИОКР.

Полученные стабильные результаты измерений прохождения ЭМВ на основе представленного метода позволили выполнить: оперативную оценку состояния изоляционного КПЭ в условиях дождя, совершенствовать качество поверхности ДКМ и улучшить конструкцию специальных изоляционных элементов, т.е.

снизить образование водной плёнки на поверхности. Представленный метод может быть полезен разработчикам изоляционных элементов и конструкций.

### Список литературы

1. Колычев А.В., Попова Ю.С., Халилов Ф.Х. Современное состояние и перспективы развития производства нелинейных ограничителей перенапряжений 0,22–750 кВ в России // Электро. 2009. №5. С. 20–23.
2. Родионов Н.Н. Оценка и прогнозирование климатической устойчивости композиции фторопласта с кварцевой тканью // Пластические массы. 2002. № 11. С. 22–24.

3. Маслов В.В. Влагостойкость электрической изоляции. М.: Энергия, 1973.

4. Effenderger J., Strickland R. The effects of rain on randomes performance // Microwave Journal. 1986. Vol. 29, № 5. P. 261–272.

Родионов Николай Николаевич — доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ГОУ ВПО «Самарский ГТУ», филиал в г. Сызрань, канд. техн. наук. Окончил электротехнический факультет Куйбышевского политехнического института в 1976 г. Защитил диссертацию по теме «Принципы конструирования и разработка диэлектрического материала с улучшенными свойствами для радиопрозрачных конструкций мощных антенных устройств СВЧ диапазона» в 1997 г. В МЭИ.

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

### Комплекс управления групповым электроприводом

КУЗЬКИН В.И., МЕЛЕШКИН В.Н., МЯСИЩЕВ С.В.,  
МОСКОВЕЦ Н.В., ШИПАЕВА С.Н.

*Разработан комплекс управления групповым электроприводом для насосных станций жилищно-коммунального хозяйства, который состоит из частотно-регулируемого преобразователя, четырёх асинхронных двигателей с насосами и переключающей контакторной аппаратуры.*

**Ключевые слова:** жилищно-коммунальное хозяйство, насосная станция, электропривод, частотно-регулируемый преобразователь.

*This is to represent worked up group electric drive control complex for housing services pumping stations, which includes frequency regulated converter, four asynchronous motors pump drives and switching contactor devices.*

**Key words:** housing services, pumping station, electric drive, frequency regulated converter.

В настоящее время жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) сталкивается с рядом проблем. Одна из них связана с изношенностью из-за длительной эксплуатации железных труб, что может приводить к их разрыву в случаях, когда повышается давление или возникает гидравлический удар. Решение указанных проблем возможно за счёт использования современных недорогих насосных станций с развитой системой автономного управления и регулирования, позволяющей отслеживать давление в магистральном трубопроводе. В данной статье описан комплекс управления групповым электроприводом (КУГЭП), разработанный ЗАО «ЭЛСИЭЛ» и предназначенный для управления четырьмя насосными агрегатами.

### Структура и основные параметры КУГЭП

Принцип действия КУГЭП иллюстрируется рис. 1, на котором в однолинейном исполнении приведена его функциональная схема.

Как видно, в состав КУГЭП входят частотно-регулируемый преобразователь (ЧРП), асинхронные двигатели ( $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  — рабочие,  $D_0$  — запасной) насосных агрегатов, контакторы — сетевые ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_0$ ) и преобразовательные ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_0$ ), а также не указанная на схеме микропроцессорная система управления (МПСУ), состоящая из блока регулирования и управления, панели местного управления и блока GPRS-модема. Асинхронные двигатели в составе КУГЭП, как правило, однотипные, соответствующие выходной мощ-

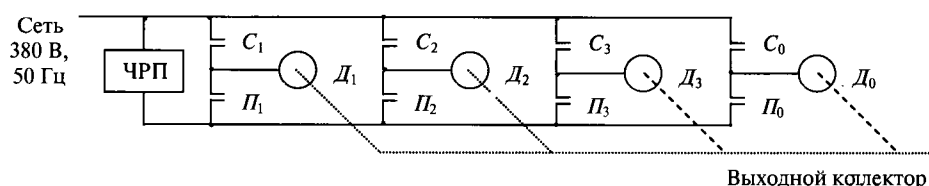


Рис. 1. Функциональная схема КУГЭП

ности ЧРП. Электропитание двигателей осуществляется от сети или от преобразователя. Насосы двигателей работают на общий коллектор, а их суммарная производительность регулируется таким образом, чтобы поддерживать неизменным давление в коллекторе при переменном расходе воды.

ЧРП служит для плавного регулирования производительности любого одного из четырёх насосных агрегатов. Коммутационная аппаратура обеспечивает подключение электродвигателей (рабочих и запасного) к преобразователю или сети, а также требуемое переключение их с выхода преобразователя на сеть и обратно. МПСУ с комплектом датчиков (электрических и технологических) и ПИД-регулятором реализует заданные алгоритмы управления в штатных и аварийных режимах КУГЭП. Панель местного управления (ПМУ) в составе КУГЭП, снабжённая жидкокристаллическим дисплеем и плёночной клавиатурой, обеспечивает оператору возможность настройки и контроля состояния системы в конкретных условиях эксплуатации.

### Основные технические параметры КУГЭП

*Электропитание — трёхфазная сеть (четырёхпроводная)*

Напряжение номинальное линейное, В . . . . 380

Допустимые колебания напряжения, % . . . .  $\pm 10$

Частота номинальная, Гц . . . . . 50

*Потребители — трёхфазные асинхронные двигатели насосов*

Мощность на валу двигателя

(номинальная), кВт. . . . . 5,5–22

Напряжение линейное (номинальное), В . . . 380

Частота (номинальная), Гц . . . . . 50

Количество двигателей в групповом электроприводе. . . . . 4

Номинальная мощность группового электропривода, кВт. . . . . 22–88

*Частотно-регулируемый преобразователь*

Мощность выходная (номинальная), кВА. . 7–28

Напряжение выходное (регулируемое), В. 15–360

Частота выходная (регулируемая), Гц . . . . 2–50

Время разгона и останова двигателя, с . . . 2–10

Коэффициент полезного действия, % . . . . .  $> 95$

Коэффициент мощности (на входе) . . . . .  $> 0,9$

*Микропроцессорная система управления*

Количество аналоговых входов, шт . . . . . 2+3

Параметры аналоговых входов:

— токовый, мА . . . . . 0(4)–20

— потенциальный, В . . . . . 0(2)–10

«Сухой» контакт

(размыкающий/замыкающий), шт . . . . . 4

### Режимы работы

КУГЭП обеспечивает работу насосных агрегатов в ручном и автоматическом режимах, причём с возможностью как местного, так и дистанционного управления. В ручном режиме управления осуществляются следующие операции:

— выбор состояния (настройка/работа) и режима работы (основной/резервный) системы;

— выбор вида (местное/дистанционное) и типа (ручное/автоматическое) управления;

— настройка стабилизируемых и контролируемых технологических параметров (давления, расхода, температуры и пр.), а также параметров ПИД-регулятора;

— принудительная ротация функций насосов, обеспечивающая равномерный износ оборудования;

— опробование системы в штатных режимах (запуск насосов и вывод их из работы).

В автоматическом режиме управления КУГЭП реализует следующие функции:

— плавное регулирование производительности насосов (основной рабочий режим), ограничивающее пусковые токи и исключающее гидродинамические удары в трубопроводе;

— ступенчатое регулирование производительности (резервный режим работы), обеспечивающее работу насосов при отказе преобразователя частоты;

— программная ротация функций насосов и автоматический ввод резерва;

— защита используемого электро- и гидроборудования от опасных последствий отказов элементов и узлов системы;



- индикация параметров и сигнализация о состоянии системы и её функциональных узлов;

- автоматическое повторное включение насосов и преобразователя частоты;

- обмен информацией системы с внешними объектами по диспетчерской сети.

В основном рабочем режиме КУГЭП обеспечивает плавный пуск одного из асинхронных двигателей и частотное регулирование производительности соответствующего насоса посредством преобразователя частоты. Нерегулируемые насосы в этом режиме могут быть по необходимости обесточены (отключённый насос) или подключены непосредственно к сети (сетевой насос), а запасной насос находится в состоянии холодного резерва (резервный насос). Такая концепция построения КУГЭП избрана по экономическим соображениям — реализуемая мощность насосной станции многократно превышает мощность ЧРП.

В резервном режиме работы осуществляется прямой пуск асинхронных двигателей и ступенчатое регулирование производительности системы с использованием контакторов. При этом каждый из насосов является нерегулируемым и может быть обесточен (отключённый насос) или подключён к сети (сетевой насос), а запасной насос по-прежнему находится в состоянии холодного резерва.

Возможность выбора предпочтительного режима работы (основной или резервный) предоставляется оператору при настройке, а в случае отказа ЧРП в основном режиме переход к резервному осуществляется автоматически.

### Алгоритмы управления

В основном рабочем режиме при отклонении технологического параметра (например, давления в напорном коллекторе) от заданного значения производительность регулируемого насоса автоматически изменяется для ком-

пенсации этого отклонения. При уменьшении текущего значения технологического параметра на 2–3% относительно заданного уровня регулируемый двигатель переключается на сеть и используется далее в качестве сетевого.

Процесс переключения иллюстрирует рис. 2, на котором приведена осциллограмма тока двигателя. Как видно, переключение осуществляется без бросков тока, что обеспечивается соответствующей синхронизацией ЧРП с сетью, т.е. при равенстве частот и начальных фаз их напряжений.

Требуемое повышение производительности КУГЭП реализуется тем, что один из отключённых двигателей подключается к преобразователю в качестве регулируемого. Если же резерв отключённых двигателей в этих условиях исчерпан, то преобразователь обеспечивает работу сетевых двигателей в течение 1–2 мин и затем отключает их, сигнализируя об аварийном состоянии трубопровода.

При увеличении текущего значения технологического параметра на 2–3% относительно заданного уровня регулируемый двигатель обесточивается и переводится в статус отключённого, а один из сетевых двигателей синхронно подключается к преобразователю в качестве регулируемого. Процесс переключения иллюстрирует рис. 3, на котором приведена осциллограмма тока двигателя. Как видно, переключение осуществляется тоже без бросков тока.

При отсутствии сетевого двигателя преобразователь переводит регулируемый двигатель в режим периодического включения/отключения, обеспечивая таким образом стабилизацию технологического параметра в условиях минимальной производительности.

В резервном режиме работы (например, при отказе преобразователя частоты) компенсация отклонений технологического параметра от заданного значения осуществляется последовательным подключением к сети от-

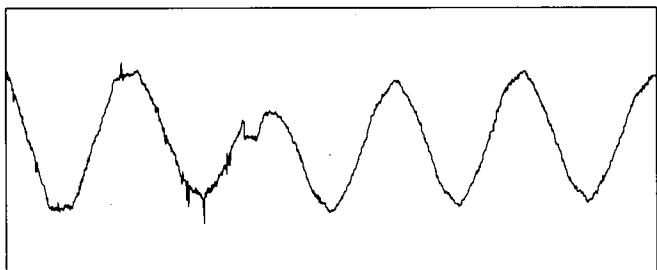


Рис. 2. Осциллограмма тока двигателя при переключении его от преобразователя к сети

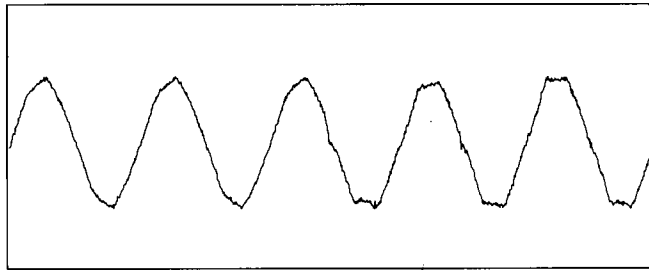


Рис. 3. Осциллограмма тока двигателя при переключении его от сети к преобразователю

ключённых двигателей или отключением сетевых двигателей. При этом подключение очередного отключённого двигателя к сети происходит при условии, если текущее значение технологического параметра уменьшилось на 3–5% относительно заданного уровня. При отсутствии отключённых двигателей в этих условиях работа сетевых двигателей допустима в течение 2–3 мин с последующим отключением и сигнализацией аварийного состояния трубопровода. Отключение очередного сетевого двигателя от сети осуществляется при условии, если текущее значение технологического параметра увеличилось на 3–5% относительно заданного уровня.

### **Ротация функций насосов и автоматический ввод резерва**

Возможность принудительной ротации функций насосов предоставляется оператору в режиме настройки КУГЭП перед вводом его в работу. Автоматическая (программная) ротация функций насосов (регулируемый, нерегулируемый или запасной — в основном режиме и приоритет их подключения/отключения — в резервном режиме) осуществляется периодически с временным интервалом (от 3 до 7 сут), задаваемым при настройке (с шагом 1 сут), без перерывов в работе системы.

При отказе регулируемого насоса в основном режиме работы его двигатель обесточивается, а взамен него к выходу преобразователя частоты автоматически подключается двигатель запасного насоса. В случае отказа сетевого насоса в основном режиме работы его двигатель также обесточивается, при этом регулируемый двигатель плавно переводится в статус сетевого, а отключённый двигатель — в статус регулируемого. При отказе сетевого насоса в резервном режиме работы его двигатель тоже обесточивается, а взамен него к питающей сети автоматически подключается двигатель запасного насоса (прямой пуск).

### **Защитные функции**

Защитные функции в КУГЭП реализуются как на общесистемном уровне, так и на уровне отдельных функциональных узлов, таких как трубопровод, питающая сеть, двигатели насосов и преобразователь частоты. Для поддержания трубопровода в исправном состоянии предусмотрена автоматическая остановка всех насосов при аварийном понижении или повышении технологических (стабилизируемо-

го и контролируемых) параметров (например, давления во всасывающем и напорном коллекторах трубопровода).

Для предотвращения аварийного состояния питающей сети необходимо исключить продолжительные токовые перегрузки (тепловая защита) и последствия КЗ в системе (электромагнитная защита). Поддержание в исправном состоянии регулируемого и сетевых двигателей обеспечивается контролем потребляемого тока (тепловая и электромагнитная защиты, а также защита от неполнофазного режима питания). При этом учитывается, что 120%-я перегрузка двигателя допустима в течение 3 мин, а 150%-я перегрузка — в течение 1 мин, так что по истечении указанных интервалов двигатель обесточивается.

Надёжное функционирование преобразователя частоты и его силовых элементов поддерживается за счёт контроля выходных токов (защита от токовых перегрузок и короткого замыкания — внешнего и внутреннего), а также контроля температуры силовых элементов, так что при превышении допустимых уровней преобразователь отключается.

В дополнение к перечисленным «узловым» защитным функциям КУГЭП реализует следующие «общесистемные» функции защиты:

- от обрыва фазы питающей сети (аварийное отключение системы);
- от последствий перерыва электроснабжения (автоматическое повторное включение насосов);
- от последствий отказа одного из насосов (автоматический ввод резерва);
- от функциональных сбоя преобразователя частоты (автоматическое повторное включение);
- от перегрузки трубопровода (автоматическое изменение уровня стабилизируемого технологического параметра в заданной зависимости от контролируемого параметра).

Следует особо отметить, что МПСУ «ведёт» так называемый журнал аварий, в котором фиксируются обстоятельства десяти последних аварийных ситуаций (с указанием их причин и следствий).

### **Автоматическое повторное включение**

Перерыв электроснабжения КУГЭП в основном рабочем режиме сопровождается обесточиванием регулируемого и сетевых насосов, поэтому с появлением напряжения в сети КУГЭП автоматически осуществляет

плавный пуск и частотное регулирование одного из двигателей с последующим переводом его (при необходимости) в статус сетевого по заданному алгоритму.

После перерыва электроснабжения КУГЭП в резервном режиме работы и связанного с ним отключения всех сетевых насосов обеспечивается автоматическое и последовательное во времени подключение к сети обесточенных двигателей (прямой пуск) по заданному алгоритму до тех пор, пока не будет достигнут заданный уровень стабилизируемого технологического параметра.

При кратковременных функциональных сбоях преобразователя частоты, повлекших срабатывание внутренних средств его защиты, автоматически осуществляется его повторное включение. Предпочтительные условия перезапуска — выдержка времени (например 10 с) и допустимое количество (к примеру 2) повторных включений, а также интервал времени (например 2 мин), в течение которого хранится информация о последнем срабатывании, задаются оператором при настройке КУГЭП. Срабатывание внутренних средств защиты за пределами заданных условий рассматривается как признак аварийного состояния преобразователя и основание для его отключения.

#### Обмен информацией по диспетчерской сети

Обмен информацией (управление и сигнализация) КУГЭП с внешними объектами (диспетчерский пульт АСУ ТП, внешний компьютер и пр.) осуществляется без перерывов режима его работы по последовательному каналу (RS-232/RS-485) или с использованием встроенного GPRS-модема.

Дистанционное управление КУГЭП возможно только при соответствующем выборе вида управления в процессе его настройки. При этом осуществляется передача и приём системой следующих команд:

- смена состояния (настройка/работа) и режима работы (основной/резервный);
- смена вида (переход на местное) и типа (ручное/автоматическое) управления;
- изменение задаваемых значений технологических параметров (стабилизируемого и контролируемого), а также параметров ПИД-регулятора;
- принудительная ротация насосов или изменение параметров программной ротации;

— изменение состава индицируемых параметров и перечня сигналов о состоянии КУГЭП и его функциональных узлов.

#### Условия эксплуатации и конструктивное исполнение

КУГЭП предназначен для эксплуатации в закрытом отапливаемом помещении при следующих условиях:

- диапазон рабочих температур от +1 до +35 °С (предельно до +40 °С);
- влажность воздуха до 80% (без образования конденсата);
- высота над уровнем моря до 1000 м включительно;
- тип атмосферы «II», наименование «Промышленная» (по ГОСТ 15150-69);
- воздействие механических факторов по группе М1(ГОСТ 17516.1-90);
- отсутствие взрывчатых и агрессивных веществ, а также токопроводящей пыли в окружающей среде.

КУГЭП выполнен в виде металлического шкафа со степенью защиты оболочки не ниже IP32 (по ГОСТ 14254-96), исполнение У, категория размещения 1 (по ГОСТ 15150-69), охлаждение естественное воздушное (с внутренней регулируемой вентиляцией).

Предусматривается как напольная, так и настенная установка шкафа, а также одностороннее обслуживание для планово-предупредительного ремонта и замены оборудования. Внешний вид КУГЭП изображён на рис. 4.

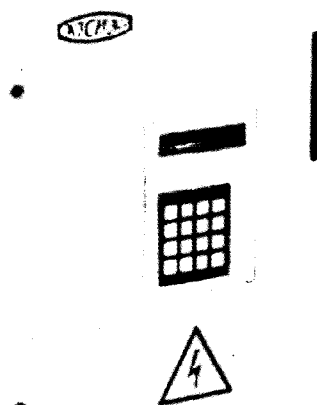


Рис. 4

**Выводы**

1. Описанный комплекс управления групповым электроприводом обеспечивает эффективную эксплуатацию систем водоснабжения в составе жилищно-коммунального хозяйства.

2. Использование нескольких (до четырёх) насосов в составе группового электропривода в сочетании с принудительной их ротацией и автоматическим вводом резерва повышает эксплуатационную надёжность систем водоснабжения.

3. Применение частотно-регулируемого преобразователя позволяет снизить стоимость пускорегулирующей аппаратуры в комплексе управления групповым электроприводом.

**Кузькин Виктор Игоревич** — директор ЗАО «ЭЛСИЭЛ», канд. техн. наук. Окончил факультет «Автоматика и телемеханика» Московского электротехнического института связи в 1967 г. Защитил диссертацию по

теме «Управление стабилизированными инверторами тока АБП» в 1983 г.

**Мелешкин Валерий Николаевич** — зам. директора по науке ЗАО «ЭЛСИЭЛ», канд. техн. наук, доцент. Окончил факультет «Автоматика и вычислительная техника» Московского института инженеров железнодорожного транспорта в 1963 г. Защитил диссертацию по теме «Бесконтактные регуляторы напряжения для генераторов управления подвижного состава» в 1967 г.

**Мясищев Сергей Вячеславович** — начальник лаборатории ЗАО «ЭЛСИЭЛ». Окончил АВТФ Московского энергетического института в 1992 г.

**Московец Николай Викторович** — ведущий инженер ЗАО «ЭЛСИЭЛ». Окончил Московский инженерно-физический институт в 1999 г.

**Шипаева Светлана Николаевна** — инженер-программист ЗАО «ЭЛСИЭЛ». Окончила факультет «Электрификация и автоматизация промышленности и транспорта» Московского энергетического института в 1965 г.

## ***Переходные процессы в сварочном инверторе переменного тока***

**БАРДИН В.М., БОРИСОВ Д.А.**

*Широкое применение силовых транзисторов в сварочных инверторах требует серьёзного изучения переходных процессов в схемах таких преобразователей с целью обеспечения их высокой надёжности. Статья посвящена исследованию в среде PSIM модели схемы сварочного инвертора переменного тока килогерцового диапазона в различных режимах работы. Сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента на физической модели показали их удовлетворительную сходимость.*

**Ключевые слова:** инвертор, переходной процесс, моделирование, сварочная дуга, электродуговая сварка.

Полупроводниковые преобразователи прочно заняли своё место на рынке электросварочной техники и продолжают успешно развиваться и совершенствоваться. Абсолютное большинство таких аппаратов имеют одинаковую структуру: сетевой выпрямитель с ёмкостным накопителем энергии — транзисторный инвертор с высокочастотным сварочным трансформатором — выходной выпрямитель с сглаживающим дросселем, т.е. сварочный процесс осуществляется на постоянном токе. Система управления позволяет задавать и поддер-

*To use power transistors in welding inverters it is necessary to do intensive transient processes research to make those schemes highly reliable. This article describes a research of a high-frequency alternative current welding inverter on different modes in PSIM environment. Examination of physical model proves the convergence of the mathematical model has been used.*

**Key words:** inverter, transient process, simulation, welding arc, electric-arc welding.

живать рабочие режимы, осуществлять защиту и выполнять ряд других функций.

Сварочные аппараты переменного тока промышленной частоты пока выполняются по традиционной трансформаторно-дроссельной схеме и поэтому существенно проигрывают инверторным аппаратам по массе и габаритам. Возникает вполне естественный вопрос: если сварку можно осуществлять переменным током частоты 50 Гц, то почему не делать то же на частоте, например, 50 кГц? Ответ на этот вопрос пока отсутствует.



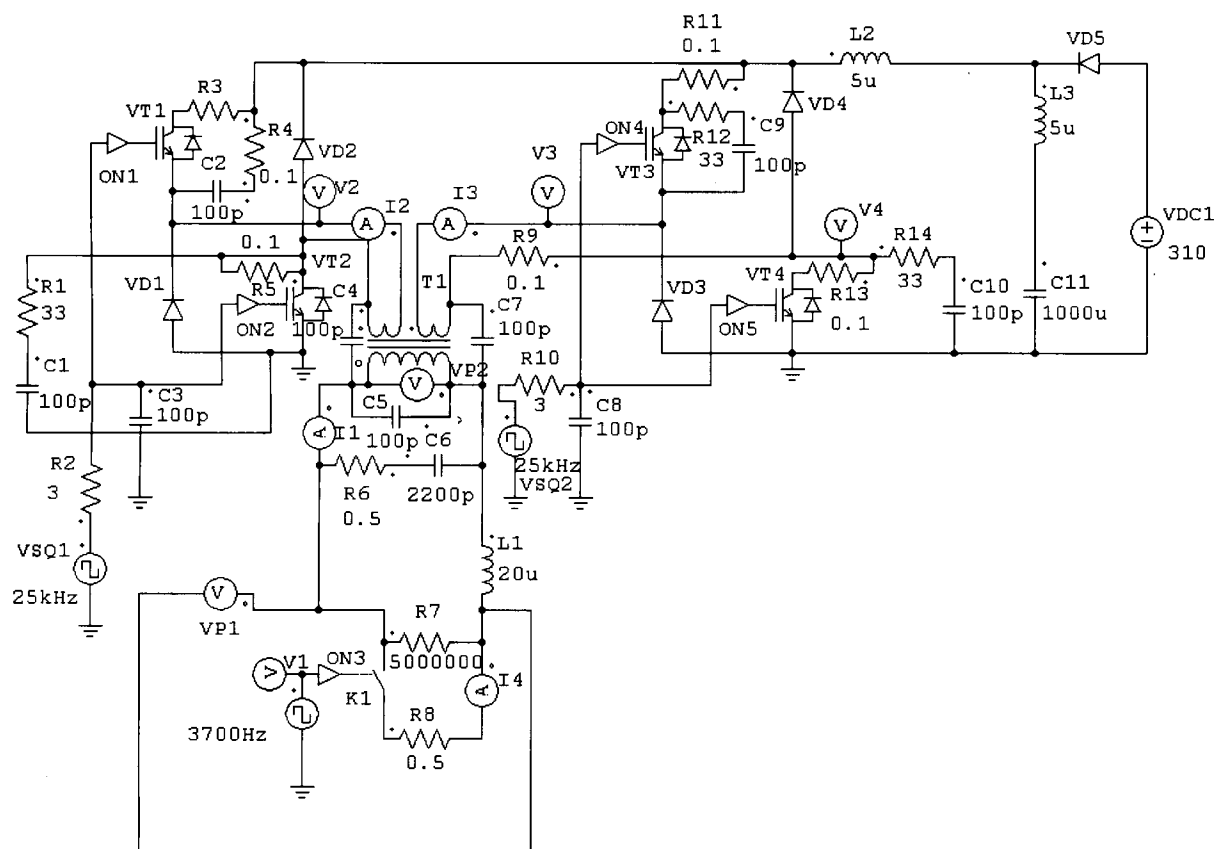


Рис. 2. Компьютерная модель сварочного инвертора переменного тока

В результате на XX на выходе схемы возбуждаются резонансные колебания.

Целью моделирования являлся предварительный анализ характера переходных процес-

сов для выявления наиболее значимых влияющих факторов. В частности:

1. Возможность резонансного возбуждения дуги.

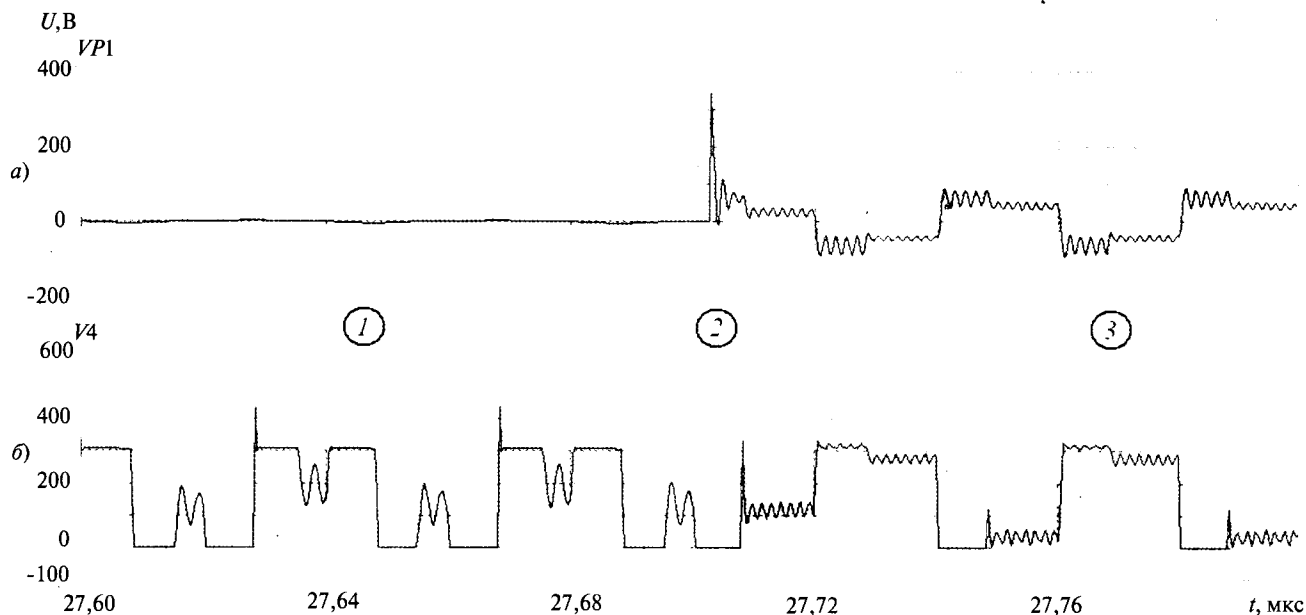


Рис. 3. Диаграммы напряжений, полученные на компьютерной модели сварочного инвертора переменного тока: а – форма напряжения на вторичной обмотке трансформатора в режиме горения дуги (1), в момент обрыва (2) и на XX (3); б – форма напряжения на транзисторе VT4 (отображается вольтметром V4 на компьютерной модели рис. 2)

2. Влияние на характер переходных процессов паразитных параметров трансформатора.

3. Наличие, характер и значение перенапряжений на элементах инвертора при обрыве дуги.

Характер этих процессов отображён на временных диаграммах (рис. 3).

Значение перенапряжений на транзисторах в моменты их выключения может кратковременно превышать напряжение источника питания. Амплитуду этих перенапряжений можно снизить путём «затягивания» переднего фронта отпирающих импульсов. Однако из-за роста коммутационных потерь это «затягивание» не рекомендуется продолжать более 2–3 мкс.

Для исследований был разработан и собран физический макет инверторного сварочного аппарата переменного тока высокой частоты. Осциллограммы переходных процессов, полученные на физическом макете аппарата с помощью цифрового двухканального осциллографа — компьютерной приставки АКТАКОМ АСК-3106-PO1, приведены на рис. 4 и 5. Наблюдается достаточно хорошее качественное соответствие диаграмм, полученных на модели, и осциллограмм физического макета. Это говорит о возможности использования данной программы для исследования процессов и оптимизации схемотехнических решений.

### Выводы

1. Электродуговую сварку металлов можно осуществлять не только на постоянном токе или на токе промышленной частоты, но и на токах с частотой в десятки кГц.

2. Резонансная цепочка на выходе инвертора способствует возбуждению дуги при относительно низких рабочих напряжениях на вторичной обмотке трансформатора.

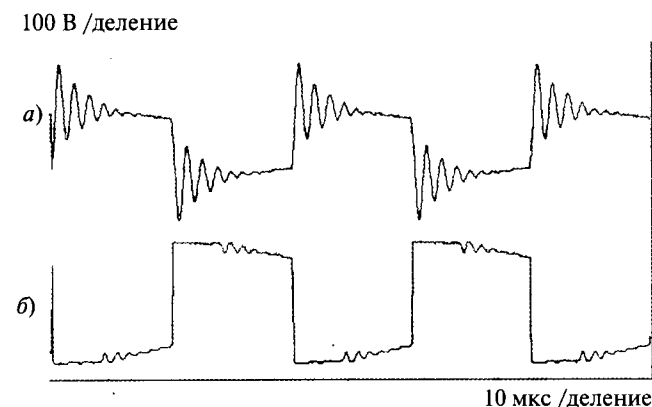


Рис. 4. Осциллограммы напряжения в контрольных точках схемы инвертора (режим XX): а — напряжение на дуговом промежутке (точки CD на рис. 1); б — напряжение на транзисторах правого плеча инвертора (точки EF на рис. 1)

100 В / деление

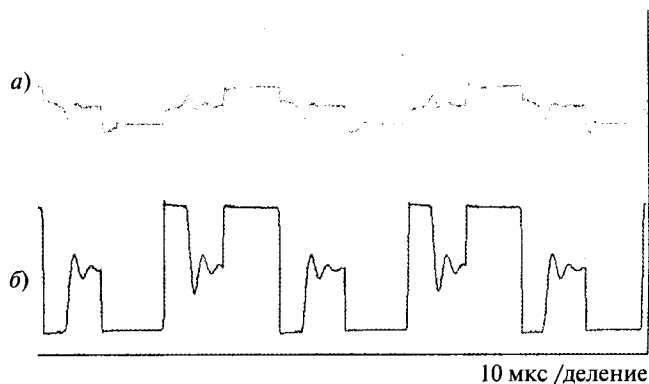


Рис. 5. Осциллограммы напряжения в контрольных точках схемы инвертора (режим горения дуги): а — напряжение на дуговом промежутке (точки CD на рис. 1); б — напряжение на транзисторах правого плеча инвертора (точки EF на рис. 1)

3. Сопоставление осциллограмм, полученных на физической модели сварочного инвертора, с диаграммами компьютерной модели показывает, что характер наблюдаемых процессов в обоих случаях в целом одинаков, качественно схож по форме и характеру колебаний, т.е. результаты исследования компьютерной и физической моделей схемы «косой полумост» в целом адекватно отображают характер переходных процессов в инверторе. Следовательно, среда PSIM может быть использована для моделирования других схем инверторов и исследования характерных для них переходных процессов.

### Список литературы

1. Эраносян С.А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Горский А.Н., Русин Ю.Н., Иванов Н.Р., Сергеев Л.А. Расчёт электромагнитных элементов источников вторичного питания. М.: Радио и связь, 1988.
3. Теоретические основы электротехники. Т.2. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля / Под ред. проф. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1982.
4. Колпаков А. PSIM — программа анализа силовых преобразовательных устройств и систем // Электронные компоненты. 2003. №6. С. 77–78.
5. Петров С. Схемотехника промышленных сварочных инверторов // Современная электроника. 2007. № 8. С. 42–47.
6. Петров С. «Косой» мост в картинках. <http://www.samopal.su/node/15>, 2008.

**Бардин Вадим Михайлович** — профессор кафедры радиотехники Мордовского ГУ им. Н.П. Огарёва, канд. техн. наук. Окончил радиотехнический факультет МЭИ в 1962 г. Защитил диссертацию по теме «Обеспечение надёжности силовых полупроводниковых преобразователей» в 1979 г.

**Борисов Дмитрий Александрович** — аспирант кафедры радиотехники Мордовского ГУ. Окончил Институт физики и химии Мордовского ГУ им. Н.П. Огарёва в 2007 г.

# Конденсаторные повышающие преобразователи постоянного напряжения с изменяющейся структурой для автономных энергосистем

ЗОТОВ Л.Г

Рассмотрен новый метод построения понижающих конденсаторных преобразователей резонансного типа, имеющих высокий КПД и способных путём изменения структуры перераспределять энергетические потоки от основного источника между одновременно работающими потребителями. Приведены результаты анализа электрических процессов и оптимизации по критерию минимума уровня кондуктивной импульсной помехи.

**Ключевые слова:** конденсаторный повышающий преобразователь постоянного напряжения; кондуктивная помеха; изменяющаяся структура; резонансный преобразователь.

В автономных сетях постоянного тока находят применение конденсаторные преобразователи постоянного напряжения (КППН), работающие по принципу параллельного (последовательного) заряда конденсаторов от входного источника постоянного напряжения с их последующим последовательным (параллельным) разрядом на нагрузку [1,2]. Инвестиционная привлекательность КППН обусловлена областью применения в автономных объектах с высокой требуемой энергоэффективностью — энергосистемы малоэтажных жилых комплексов, автомобилей и т.д. Предлагаемые КППН обладают не только малыми габаритами, технологичностью производства (сетевые трансформаторы отсутствуют), но и высоким КПД, благодаря применению резонансных

*A new method for constructing resonant step-up converters of capacitor type with high efficiency and capacity by changing the structure to redistribute power flows from the main power between simultaneously working users is considered. Results of the analysis of electrical processes and optimization of the criterion of minimum levels of conductive impulse noise are given.*

**Key words:** step-up DC converter with switching capacitors; conductive noise; changing structure; resonant step-down converter.

высокочастотных ключевых элементов —МОП и IGBT транзисторов. Кроме того, внедрение новых, перспективных методов построения КППН с изменяющейся структурой [3,4,5] позволяет дополнительно снизить их габариты и существенно уменьшить уровень создаваемых ими импульсных помех.

В статье дано описание нового метода построения регулируемых повышающих КППН резонансного типа с изменяющейся структурой, приведены результаты анализа электрических процессов и оптимизации по критерию минимума уровня создаваемых импульсных помех.

На рис. 1 приведена схема регулируемого повышающего КППН [5], обладающего всеми перечисленными положительными свойствами.

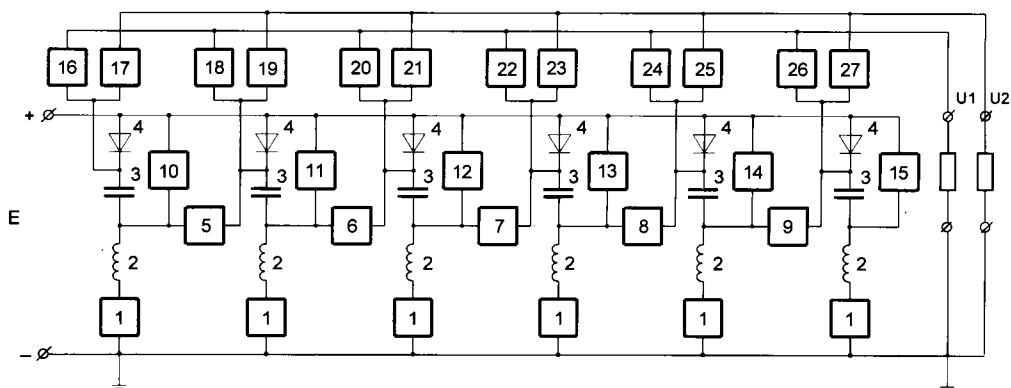


Рис. 1. Структурная схема резонансного, регулируемого КППН



ми. Снижение габаритов и увеличение КПД достигается благодаря повышению частоты преобразования до 500 кГц и выше и уменьшением коммутационных потерь в высокочастотных зарядных ключах 1 введением в силовую цепь последовательных реакторов 2, обеспечивающих режим их мягкой коммутации [6].

Преобразователь состоит из идентичных конденсаторно-диодных цепочек (КДЦ) (элементы 1, 2, 3, 4,), объединённых в группы однотипных конденсаторных преобразователей (ОКП) по числу потребителей, на которые они нагружены. Если количество КДЦ в отдельном ОКП  $n_j$ , а число ОКП в группе равно  $k_j$ , где  $j = 1, 2, \dots, K$  — число потребителей КППН, то при условии, что все цепочки задействованы, выражение, связывающее  $k_j$  и  $n_j$  с общим числом цепочек преобразователя  $N$ , имеет вид

$$\sum_{j=1}^K k_j n_j = N.$$

КППН, имеющий две нагрузки, работает следующим образом. В исходном состоянии преобразователь состоит из двух групп, содержащих соответственно  $k_1$  и  $k_2$  (целые числа) повышающих ОКП. Последние состоят из  $n_1$  и  $n_2$  цепочек каждый. Группы ОКП работают на соответствующие нагрузки. Принцип действия повышающего ОКП заключается в периодическом параллельном подзаряде конденсаторов его цепочек от входного источника постоянного напряжения  $E$  через зарядные ключи 1 с их последующим последовательным разрядом на нагрузку через соответствующие данному состоянию разрядные ключи (5–15). Так как разряд конденсаторов на нагрузку происходит через последовательно соединённый источник  $E$ , то силовая цепь ОКП упрощается уменьшением числа КДЦ на единицу. В результате выходные напряжения преобразователя

$$U_{H1} = (n_1 + 1)E; \quad U_{H2} = (n_2 + 1)E,$$

а их регулировка осуществляется изменением  $n_1$  и  $n_2$ . Увеличение количества ОКП ( $k_1$  и  $k_2$ ) приводит к пропорциональному росту максимальных токов соответствующих нагрузок. При этом цепочки могут отключаться от слаботочной нагрузки и подключаться к потребителю, ток которого увеличился, и наоборот. Это позволяет более полно использовать установленную ёмкость

силовой цепи преобразователя и, следовательно, улучшить его массогабаритные показатели. Изменение структуры силовой цепи КППН и связанное с ним изменение  $n_1$ ,  $n_2$  и  $k_1$ ,  $k_2$  легко осуществляются коммутацией сигналов управления разрядных ключей (5–27). С целью минимизации уровня кондуктивной импульсной помехи на зажимах входного источника  $E$  подзаряд конденсаторов ОКП в группах осуществляется положительными импульсами синусоидального тока длительностью  $1/2T_K$ . При этом импульсы равномерно распределены по периоду  $T_K$  со сдвигом друг относительно друга  $(\Delta t)_j = (T_K/k_j)$ , как показано на рис. 2. Зарядный ток ОКП  $j$ -й группы определяется выражением

$$i_j(t, \tau_j) = I_j \sum_{i=0}^{k_j-1} \left[ \sin \omega_K \left( t - i \frac{T_K}{k_j} - \tau_j \right) \right] \times \\ \times I \left[ i \frac{T_K}{k_j} + \tau_j \frac{T_K}{2} + i \frac{T_K}{k_j} + \tau_j \right],$$

где  $\tau_j$  — временной сдвиг последовательности импульсов зарядного тока  $j$ -й группы ОКП относительно начала координат;  $I_j = \frac{\Delta E}{\rho} = \frac{\pi}{k_j} n_j I_{Hj}$

— амплитуда зарядного тока ОКП  $j$ -й группы;  $\Delta E$  — пульсация напряжения на конденсаторах ОКП  $j$ -й группы;  $\rho = \frac{1}{n_j} \sqrt{\frac{L}{C}}$  — характеристическое сопротивление зарядного контура ОКП  $j$ -й

группы;  $I_{Hj} \approx \frac{(n_j + 1)}{R_{Hj}} E$  — среднее значение тока

$j$ -й нагрузки;  $\omega_K = \frac{2\pi}{T_K} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  — резонансная частота зарядного контура;  $L, C$  — индуктивность и ёмкость КДЦ;  $I \left[ \frac{T_K}{k_j} + \tau_j \frac{T_K}{2} + i \frac{T_K}{k_j} + \tau_j \right]$  — раз-

рывная единичная функция, равная единице внутри интервала, указанного в квадратных скобках, и нулю вне его.

Кондуктивную импульсную помеху, создаваемую  $j$ -й группой ОКП удобно оценить действующим значением переменной составляющей тока  $i_j(t)$ :

$$i_{jd} \sim \sqrt{i_{jd}^2 - i_{j0}^2} = \\ = \sqrt{\frac{1}{T_K} \int_0^{T_K} i_j^2(t) dt - \left[ \frac{1}{T_K} \int_0^{T_K} i_j(t) dt \right]^2},$$

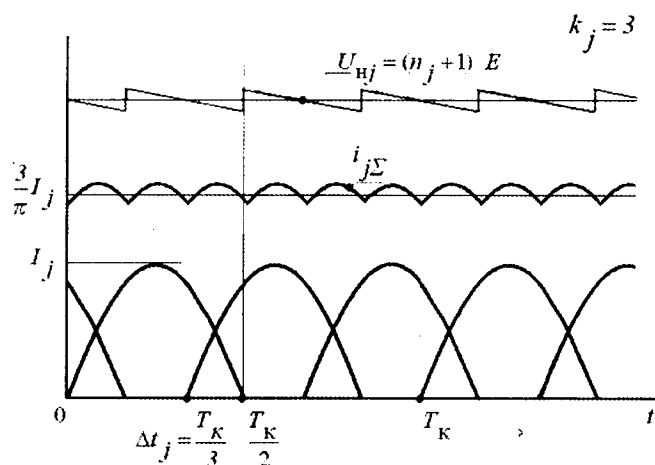


Рис. 2. Временные диаграммы процессов в группе ОКП

где  $i_{j0} = \frac{1}{T_K} \int_0^{T_K} i_j(t) dt = I_j \frac{k_j}{\pi}$  – среднее значение зарядного тока  $i_j(t)$ .

С увеличением количества ОКП в группе  $k_j$  происходит уменьшение  $i_{jd\sim}(k_j)$ . В таблице приведены результаты моделирования, иллюстрирующие темпы снижения уровня помехи с увеличением  $k_j$ .

$k_j$	2	3	4	5	6	7
$i_{jd}/i_{j0}$	0,483455	0,042200	0,097759	0,015040	0,042200	0,007927

Активная мощность  $j$ -й нагрузки определяется средним значением тока  $i_{j0}$ . Поэтому, сравнивая значения  $i_{jd\sim}$  для одинаковых  $i_{j0}$ , приходим к выводу, что уменьшение дейст-

вующего значения тока помехи  $i_{jd\sim}$  для нечётных  $k_j$  происходит на существенно меньшем уровне. Например, для  $k_j$ , равных трём и шести, значения  $i_{jd\sim}$  совпадают. Отсюда следует вывод о целесообразности построения групп только из нечётного количества ОКП.

Из закона сохранения заряда следует, что средние значения токов всех ключей ОКП  $j$ -й группы одинаковы и

$$I_{к.ср} = \frac{1}{n_j} I_j = \frac{\pi}{k_j} I_{Hj}.$$

Амплитуда тока через зарядные ключи 1 ОКП  $j$ -той группы

$$I_{к1} = \frac{1}{n_j} I_j = \frac{\pi}{k_j} I_{Hj}.$$

Количество ОКП в группах  $k_j$ , значения ёмкости  $C$  и индуктивности  $L$  цепочек определяются из максимального требуемого тока  $I_{Hj\max}$ , коэффициента пульсации напряжения по первой гармонике  $K_{п1} = \frac{U_{п1}}{U_{п0}}$   $j$ -й нагрузки и частоты коммутации ключей  $\omega_K$

$$k_j C = \frac{2n_j I_{Hj\max}}{K_{п1} \omega_K (n_j + 1) E}; L = \frac{1}{\omega_K^2 C}.$$

Если закон изменения структуры КППН задан, то его силовая цепь существенно упрощается. Например, если при  $n_1=1$ ,  $n_2=2$  и  $N=6$  требуется обеспечить работу КППН в двух состояниях ( $k_1=2$ ;  $k_2=2$  и  $k_1=0$ ,  $k_2=3$ ), то один из возможных вариантов реализации его силовой цепи представлен на рис. 3.

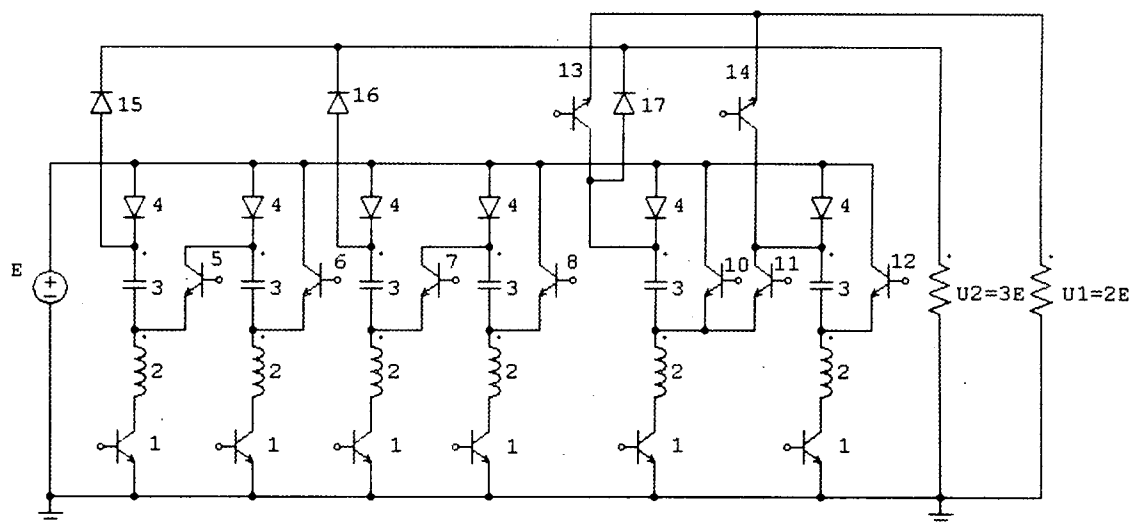


Рис. 3. Принципиальная схема силовой цепи КППН

Первое состояние реализуется запиранием ключа 11. При этом четыре первые и две последние цепочки образуют группы по два ОКП с коэффициентами преобразования, равными трём и двум, что соответствует состоянию КППН  $k_1=2$ ,  $n_1=1$ ,  $k_2=2$ ,  $n_2=2$ . Второе состояние ( $k_1=0$ ,  $k_2=3$ ) реализуется запиранием ключей 10, 13 и 14. При этом две последние цепочки объединяются в ОКП с коэффициентом преобразования, равным трём. Этот ОКП совместно с двумя аналогичными ОКП и диодами (15–17) образуют новую группу, обеспечивающую второе состояние КППН ( $k_1=0$ ,  $n_1=0$ ,  $k_2=3$ ,  $n_2=2$ ).

Если для реализации каждого из состояний используется установленная мощность всех элементов силовой цепи, то выигрыш по количеству максимален и определяется отношением числа КДЦ, необходимых для одновременного обеспечения максимальной мощности всех  $K$  потребителей, к числу цепочек, достаточному для создания максимальной мощности в одной из них. Выигрыш максимален при поочередной работе потребителей и равен их числу  $K$ :

$$B_{\max} = \frac{\sum_{j=1}^K k_{j\max} n_j}{(\sum_{j=1}^K k_j n_j)_{\max}} = \frac{KN}{N} = K.$$

Дальнейшее уменьшение уровня кондуктивной импульсной помехи при одновременной работе КППН на несколько нагрузок достигается оптимальным выбором временных сдвигов  $\tau_j$  ( $j=1, 2, \dots, K$ ) последовательностей зарядных токов  $i_j(t, \tau_j)$  отдельных групп ОКП. Критерий оптимизации формулируется следующим образом: при одинаковых частотах

коммутации ключей  $F_K = \left(\frac{1}{T_K}\right)$ , работающих со

скважностью равной двум, определить временные сдвиги  $\tau_j$  последовательностей синусоидальных импульсов тока  $i_j(t, \tau_j)$  отдельных групп ОКП, обеспечивающих минимум квадрата действующего значения суммарного зарядного тока, потребляемого всеми группами ОКП от входного источника  $E$ :

$$i_{\Sigma}^2(\tau_j) = \frac{k_{\min}}{T_K} \int_0^{\frac{T_K}{2}} \left[ \sum_{j=1}^K i_j(t, \tau_j) \right]^2 dt = \min.$$

Здесь  $k_{\min}$  – наименьшее количество ОКП в группах КППН.

Оптимальный выбор временных сдвигов  $\tau_j$  обеспечивает также минимум квадрата действующего

значения переменной составляющей суммарного зарядного тока  $i_{\Sigma}^2(\tau_j) = i_{\Sigma}^2(\tau_j) - i_{0\Sigma}^2$ .

Его значение характеризует энергию кондуктивной импульсной помехи, создаваемой КППН. Постоянная составляющая суммарного зарядного тока не зависит от  $\tau_j$  и

$$i_{0\Sigma} = \frac{1}{T_K} \int_0^{T_K} i_{\Sigma}(t, \tau_j) dt = \sum_{j=1}^K I_j \frac{k_j}{\pi}.$$

Если  $k_{\max}$  – наибольшее количество ОКП в группах КППН, то для двух нагрузок анализ даёт следующие выражения для оптимальных временных сдвигов  $\tau_j$ :

$$\tau_1 = 0; \tau_2 = \frac{T_K}{2k_{\max}}; \tau_2 = \frac{T_K}{4k_{\max}}, \text{ соответственно}$$

но для чётных и нечётных значений  $k_{\max}$ . Например для первого состояния КППН на рис. 3 ( $k_1=2$ ,  $n_1=1$ ), ( $k_2=2$ ,  $n_2=2$ ) оптимальный временной сдвиг  $\tau_2 = \frac{T_K}{4}$  (рис. 4).

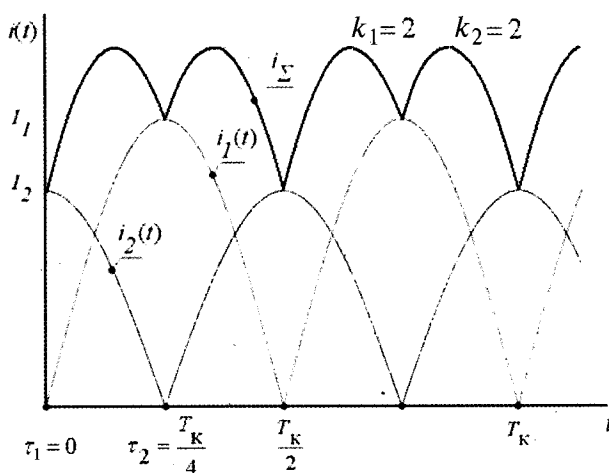


Рис. 4. Временные диаграммы КППН при  $k_1 = k_2 = 2$

При этом минимальное действующее значение переменной составляющей суммарного зарядного тока КППН определяется выражением

$$i_{\min\Sigma}^2(\tau_2 = \frac{T_K}{4}) = \frac{I_1^2 + I_2^2}{2} + \frac{2}{\pi} I_1 I_2 - \left[ \frac{2}{\pi(I_1 + I_2)} \right]^2.$$

При  $\tau_1 = \tau_2 = 0$

$$i_{\max\Sigma}^2(\tau_2 = 0) = \frac{(I_1 + I_2)^2}{2} - \left[ \frac{2}{\pi(I_1 + I_2)} \right]^2.$$

Если КППН одновременно работает на две нагрузки группами из трёх ОКП ( $k_1 = k_2 = 3$ ),

то оптимальный сдвиг  $\tau_2 = \frac{T_K}{12}$  (рис. 5), а соответствующее ему минимальное значение квадрата действующего суммарного зарядного тока

$$i_{\text{mind}\Sigma}^2(\tau_2 = \frac{T_K}{12}) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \right) (I_1^2 + I_2^2) + \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{3}{\pi} \right) I_1 I_2 - \left[ \frac{3}{\pi(I_1 + I_2)} \right]^2.$$

Его максимум также достигается при  $\tau_1 = \tau_2 = 0$ :

$$i_{\text{maxd}\Sigma}^2(\tau_2 = 0) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \right) (I_1^2 + I_2^2) - \left[ \frac{3}{\pi(I_1 + I_2)} \right]^2.$$

Важно отметить, что для типовых ОКП ( $k_j = 2, 3$ ) эффективность проведённой оптимизации весьма существенна. Для её оценки достаточно сравнить максимальные и минимальные значения  $i_{\text{д}\Sigma}^2$ . При одинаковых амплитудах импульсов тока в группах ( $I_1 = I_2$ )  $\frac{i_{\text{maxd}\Sigma}^2}{i_{\text{mind}\Sigma}^2} = 24,41$  для  $k_1 = k_2 = 2$  и 15,46 для  $k_1 = k_2 = 3$ .

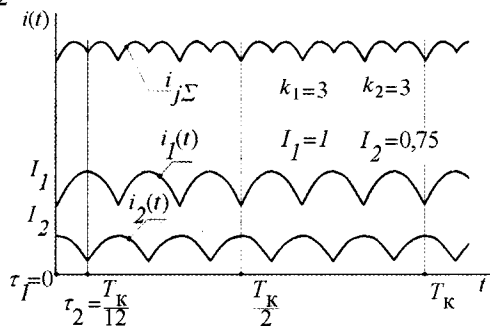


Рис. 5. Временные диаграммы КППН при  $k_1 = k_2 = 3$

## Выводы

1. Предложен новый принцип построения регулируемых конденсаторных повышающих преобразователей постоянного напряжения резонансного типа, имеющих высокий КПД и способных путём изменения структуры перераспределять энергетические потоки от основного источника между одновременно работающими потребителями.

2. Проведён анализ электрических процессов, позволяющий рассчитать параметры режимов работы элементов силовой цепи и дать рекомендации по применению в группах КППН только нечётного количества ОКП.

3. Оптимальный выбор временных сдвигов управляющих сигналов цепи управления подтвердил высокую эффективность преобразователя по снижению уровня создаваемой кондуктивной импульсной помехи.

## Список литературы

1. On-Cheong Mak, Yue-Chung Wong, and Adrian Ioinovici. Step-up DC Power Supply Based on a Switched-Capacitor Circuit // IEEE Transactions on industrial electronics. Febr.1995. Vol. 42, no 1. P. 90–97.
2. J. Han, A. von Jouanne, and G.S.Temes. A New Approach to Reducing Output Ripple in Switched-Capacitor-Based Step-Down DC-DC Converters // IEEE Transactions on power electronics. Nov.2006. Vol. 21, no 6. P.1548–1555.
3. Пат. 2284633 RU. Регулируемый понижающий преобразователь постоянного напряжения / Л.Г. Зотов. Оpubл. БИ. 2006. №27.
4. Пат. 2323515 RU. Регулируемый понижающий преобразователь постоянного напряжения / Л.Г. Зотов. Оpubл. БИ. 2008. №12.
5. Пат. RU №2394345. Регулируемый повышающий преобразователь постоянного напряжения / Л.Г. Зотов. Оpubл. БИ. 2010. №19.
6. Ф.К. ЛИ. Высокочастотные квазирезонансные преобразователи // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). 1988. Т.76, №4. P. 83–97.

Зотов Леонид Григорьевич — доцент кафедры «Теоретические основы радиотехники» Новосибирского ГТУ, канд. техн. наук. Окончил физико-технический факультет Новосибирского ГТУ в 1971 г. Защитил диссертацию по теме «Разработка и исследование каскадных бестрансформаторных источников питания маломощных радиотехнических устройств» в 1981 г.

# Исследование активного полупроводникового преобразователя в среде Matlab-Simulink

ГЕРМАН-ГАЛКИН С.Г., ГАВРИЛОВ С.В.

Разработана методика создания моделей активного полупроводникового преобразователя (АП) в среде Matlab-Simulink при проектировании вентильного моментного электропривода (ВМЭП). Активный полупроводниковый преобразователь в ВМЭП выполняет роль вторичного источника питания. Дано математическое описание АП по «гладкой» составляющей и проведено исследование его статических характеристик. Рассмотрены различные варианты построения систем управления АП.

**Ключевые слова:** активный полупроводниковый преобразователь, вентильный моментный электропривод, моделирование, проектирование.

При проектировании вентильного моментного электропривода (ВМЭП) для опорно-поворотного устройства комплекса управления движением оптической оси телескопов [1] используется активный полупроводниковый преобразователь (АП). Особенность ВМЭП заключается в необходимости рекуперировать механическую энергию в питающую сеть переменного тока.

АП в данной работе назван трёхфазный инвертор, связывающий сеть переменного тока с цепью постоянного тока. Основная задача АП — обеспечить двустороннюю энергетическую связь между сетью переменного и постоянного тока.

Кроме основной задачи АП может обеспечить решение и дополнительных задач:

- синусоидальную форму потребляемого из сети тока;
- коэффициент мощности  $\cos\varphi=1$  во всём диапазоне регулирования электропривода;
- компенсацию реактивной мощности других потребителей в сети.

При работе исполнительный машины электропривода в двигательном режиме АП выполняет функцию активного выпрямителя (АВ) [2]. При работе исполнительный машины в генераторном режиме АП выполняет функцию сетевого инвертора (СИ) [3].

При разработке АП для вентильного электропривода встаёт задача его проектирования

*The article is devoted to the development of method to create models of the active semiconductor converter (ASC) in Matlab-Simulink environment for designing brushless torque drive (BTD). The active semiconductor converter in BTD serves as a secondary power supply (SPS). The mathematical description of the ASC given by a «smooth» component and study its static characteristics. Different versions of control systems ASC presented.*

**Key words:** active semiconductor converter, brushless torque drive, modeling, design.

в системе, включающая вопросы анализа электромагнитных и энергетических процессов, расчёта основных характеристик и элементов АП, а также синтез регуляторов в системе, обеспечивающих заданные статические и динамические характеристики.

АП представляет собой нелинейную многосвязную, импульсную систему с дискретно-изменяющимися параметрами. Анализ такой системы может быть осуществлён различными методами [4,5], большинство из которых приводит к необходимости численных расчётов электромагнитных процессов на ЭВМ.

Эти задачи уже нецелесообразно решать при помощи написания специализированных программ. В распоряжении разработчика в настоящее время имеется большое количество программных продуктов, лучшим из которых для исследования электромеханических систем является пакет SimPower System программной среды Matlab-Simulink.

Для решения задач проектирования АП в пакете SimPower System имеется полный набор виртуальных блоков для моделирования силовой части АП. Управляющая часть АП моделируется с использованием основной библиотеки Simulink [6]. Наряду с удобством применения специализированных программных продуктов этот способ имеет и свои недостатки. Основным недостатком разработки модели в среде Matlab-Simulink является необходи-

мость проверки её адекватности, т.е. соответствия процессам в реальной системе.

Только после того, как модель составлена и доказана её адекватность, можно переходить к её всестороннему исследованию с последующим проектированием реальной системы.

При построении новой системы, когда её структура и параметры заранее не известны, проверка адекватности модели требует разработки методики, применимой к рассматриваемому классу систем. Для этого, прежде всего, необходимо аналитически оценить некоторые характерные свойства разрабатываемой системы, которые могут послужить основой для её проверки. В дальнейшем, после создания модели, эти режимы можно исследовать (реализовать) на модели, сравнить их с полученными аналитическими результатами и доказать адекватность модели.

Построение модели системы сродни разработке экспериментального образца. Поэтому часто эта задача решается методом последовательных приближений, при котором приходится иногда возвращаться к началу, перепроверяя и сверяя аналитический и модельный эксперименты. В [7–9] вопросам модельного проектирования АП уделялось необоснованно мало внимания.

#### Аналитическое исследование электромагнитных и энергетических характеристик АП

Базой аналитических методов рассматриваемого класса систем служит теоретическое положение, разработанное А.А. Булгаковым [10,11], заключающееся в том, что электромагнитные и энергетические характеристики АП определяются основной (гладкой) составляющей.

Пulsации токов и мощностей, вызванные переключением силовых полупроводниковых элементов, вызывают незначительные искажения формы токов и дополнительные (обычно незначительные) потери. Основываясь на этом положении, удаётся аналитически описать и исследовать некоторые характерные режимы работы АП по гладкой (основной) составляющей.

Функциональная схема АП с системой управления (СУ АП) представлена на рис. 1. Она содержит трёхфазный инвертор, присоединённый к сети переменного тока через дроссели, с одной стороны, и к конденсатору

фильтра в звене постоянного тока с активной нагрузкой, с другой.

В основе математического описания электромагнитных процессов в АП по гладкой составляющей лежит метод пространственного вектора [5].

При анализе электромагнитных процессов в АП с использованием метода пространственного вектора его математическое описание может быть представлено в виде:

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_{01} + r\bar{i}_1 + L \frac{d\bar{i}_1}{dt} + jX\bar{i}_1, \quad (1)$$

где  $\bar{U}_1, \bar{i}_1$  — результирующие вектора напряжения и тока сети;  $\bar{E}_{01}$  — результирующий вектор первой гармоники противоЭДС АП;  $r$  — активное сопротивление, учитывающее сопротивление источника, дросселя и трёх проводящих полупроводниковых приборов АП;  $X = \omega L = 2\pi fL$  — реактивное сопротивление;  $L$  — индуктивность дросселя.

По отношению к сети переменного тока АП генерирует ЭДС, 1-я гармоника (гладкая составляющая) которой [5]:

$$\bar{E}_{01} = \frac{mU_d}{2} \exp(j\varphi_m), \quad (2)$$

где  $m$  — коэффициент модуляции;  $\varphi_m$  — фаза сигнала модуляции по отношению к напряжению сети;  $U_d$  — напряжение на конденсаторе.

В синхронно вращающейся системе координат ( $x$  — вещественная ось) и ( $y$  — мнимая

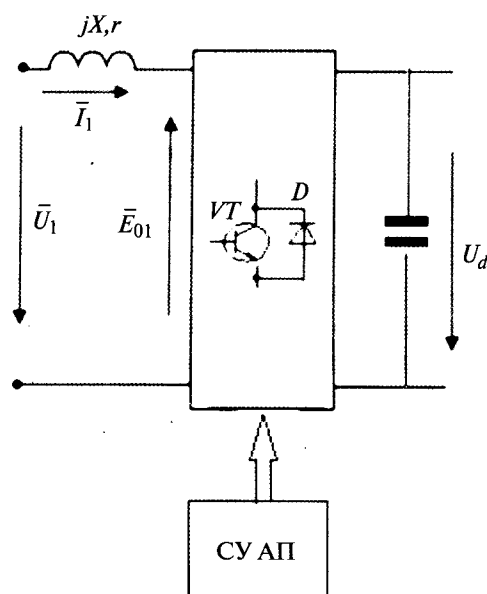


Рис. 1. Активный преобразователь в цепи питания ВМЭП

ось) при совмещении вещественной оси с вектором напряжения сети уравнения (1),(2) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} U_x &= U_1 = E_x + r i_x + L \frac{di_x}{dt} - X i_y; \\ 0 &= E_y + r i_y + L \frac{di_y}{dt} + X i_x; \\ E_x &= \frac{m U_d}{2} \cos \varphi_m; \quad E_y = \frac{m U_d}{2} \sin \varphi_m, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_1$  — амплитуда фазного напряжения сети;  $E_x, E_y$  — амплитуды 1-х гармоник ЭДС АП.

Для полного описания АП систему уравнений (3) следует дополнить уравнением энергетического баланса и уравнением Кирхгофа в цепи постоянного тока:

$$\frac{3}{2} U_1 i_x = U_d i_d + \frac{1}{2} r (i_x^2 + i_y^2); \quad C \frac{dU_d}{dt} = i_d - i_n, \quad (4)$$

где  $C$  — ёмкость конденсатора фильтра;  $i_n$  — ток нагрузки.

Некоторые свойства АП удобно выяснить, используя векторные диаграммы, построенные для установившегося режима работы. Векторные диаграммы АП в синхронно вращающейся системе координат  $x$  и  $y$  для четырёх характерных режимов работы, показаны на рис. 2.

При построении векторных диаграмм не учитывалось падение напряжения на сопротивлении  $r$ , так как оно обычно пренебрежимо мало по сравнению с напряжением на реактивном сопротивлении  $X$ . Из векторных диаграмм следует, что реактивная мощность в сети положительна (индуктивная), когда выполняется неравенство  $\text{mod } \bar{U}_1 > \text{mod } \bar{E}_{01}$  и от-

рицательна (ёмкостная) при  $\text{mod } \bar{U}_1 < \text{mod } \bar{E}_{01}$ .

По отношению к сети переменного напряжения АП может потреблять активную мощность (при  $\varphi_m < 0^\circ$ ) или отдавать (рекуперировать) активную мощность в сеть (при  $\varphi_m > 0^\circ$ ).

Таким образом, если в качестве переменных режима (управляющих переменных) выбраны коэффициент  $m$  и фаза модуляции  $\varphi_m$ , то АП позволяет регулировать активную и реактивную мощность.

Однако для поддержания в системе баланса мощности между сетью и исполнительным двигателем электропривода управление АП осуществляется путём слежения за средним током задания. При таком управлении каналы  $x$  и  $y$  строятся замкнутыми по току. При этом чаще всего используются релейные регуляторы. Такое построение обеспечивает скользящий режим работы каждого канала. Применительно к устройствам силовой электроники скользящий режим работы получил название «токового коридора».

При реализации «токового коридора» перекрёстные связи между каналами практически не проявляются, что позволяет их считать развязанными. Поэтому управление потоком активной мощности как в переходных, так и в установившихся режимах осуществляется только по каналу  $x$ . В этом случае баланс мощности между сетью и исполнительной машиной электропривода достигается при поддержании постоянного значения напряжения на конденсаторе. При использовании подчинённой структуры управления АП контур стабилизации напряжения на конденсаторе строится как внешний по отношению к релейному контуру

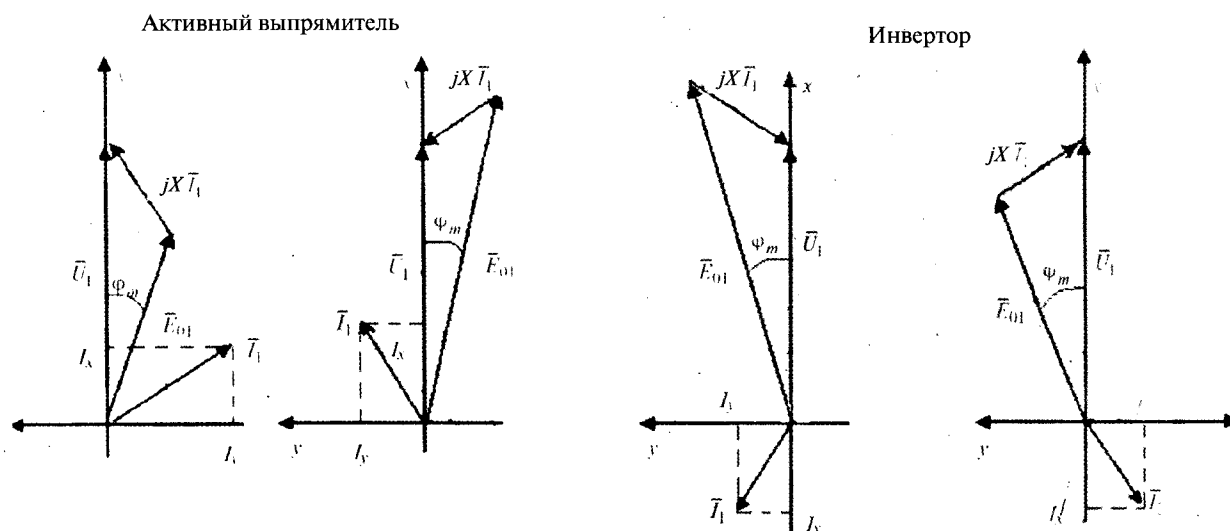


Рис. 2. Векторные диаграммы АП в синхронно вращающейся системе координат





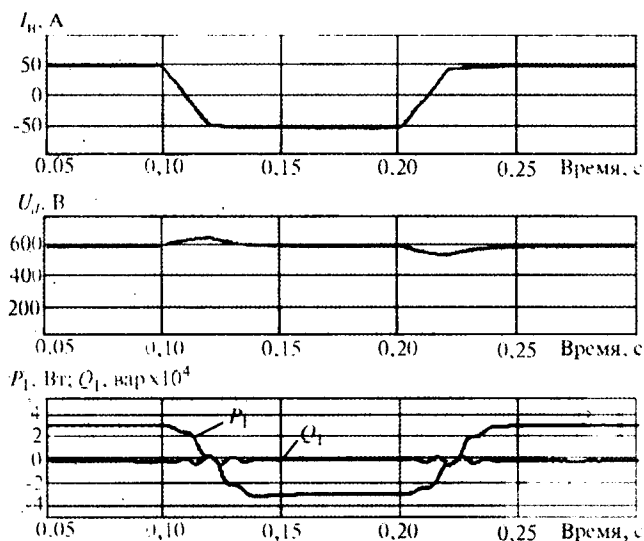


Рис. 5. Квазиустановившиеся и переходные процессы в АП с токовым управлением и контуром стабилизации напряжения

об адекватности структурной модели и возможности её использования для исследования статических и динамических характеристик АП в ВМЭП. Для исследования статических и динамических характеристик в модели (рис. 4) формировался трапецеидальный сигнал тока нагрузки (блок ИН) и снимались зависимости

напряжения в звене постоянного тока, активной и реактивной мощности в питающей сети переменного тока. Форма и параметры тока нагрузки заданы как предельные в техническом задании на ВМЭП. На рис. 5 приведены эти зависимости при амплитуде тока нагрузки 50 А, скорости изменения тока нагрузки 5000 А/с и токе в канале  $I_y = 0$ .

Из рассмотрения рис. 5 следует, что в переходных режимах наблюдается кратковременное отклонение выходного напряжения от заданного значения и колебания активной и реактивной мощности в питающей сети. В установившихся режимах АП потребляет или рекупирует активную мощность. При этом реактивная мощность остаётся равной нулю.

Разработка структурной модели, позволяющая оценить некоторые статические и динамические свойства АП, является лишь первым приближением в решении задачи проектирования. Следующим шагом явилась разработка виртуальной модели, которая позволяет определить электромагнитные нагрузки и рассеиваемые мощности на каждом элементе АП в различных режимах его работы, исследовать спектральный состав напряжений и токов и оценить совместимость работы АП с цепями постоянного и переменного тока, исследовать

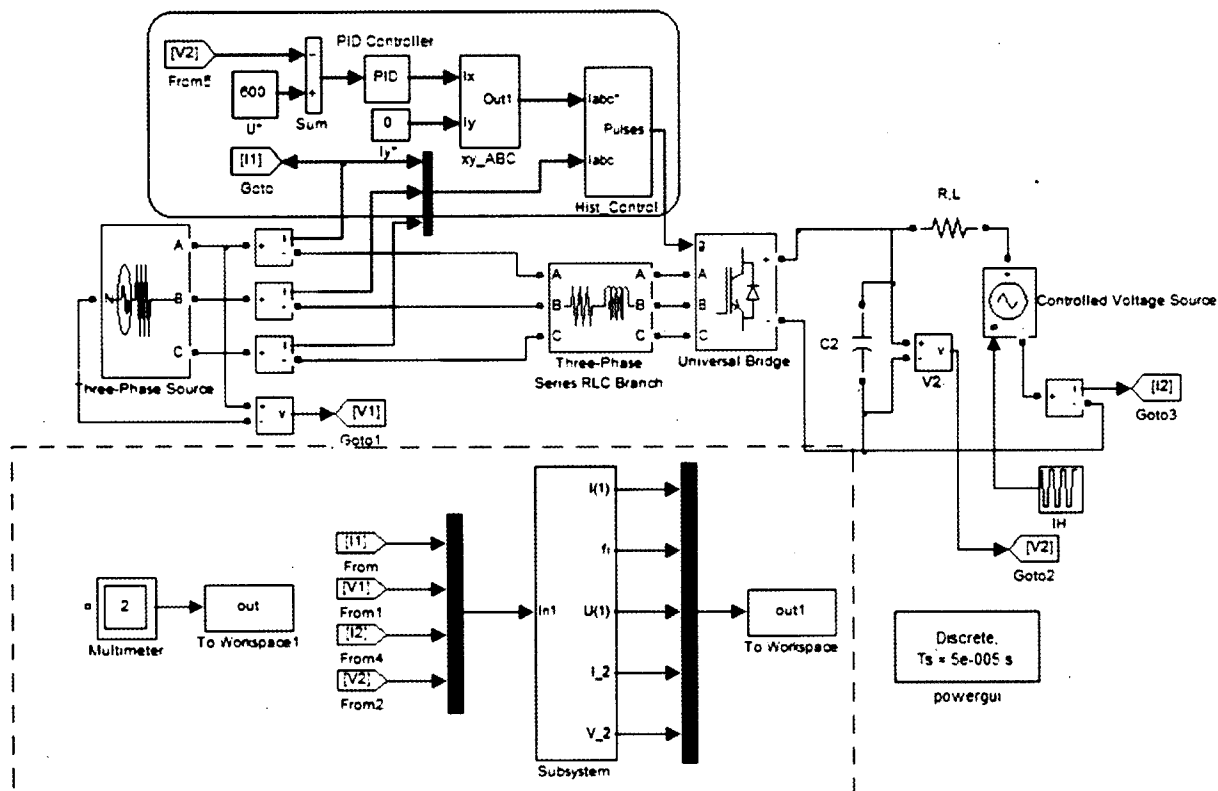


Рис. 6. Виртуальная модель АП с токовым управлением и контуром стабилизации напряжения

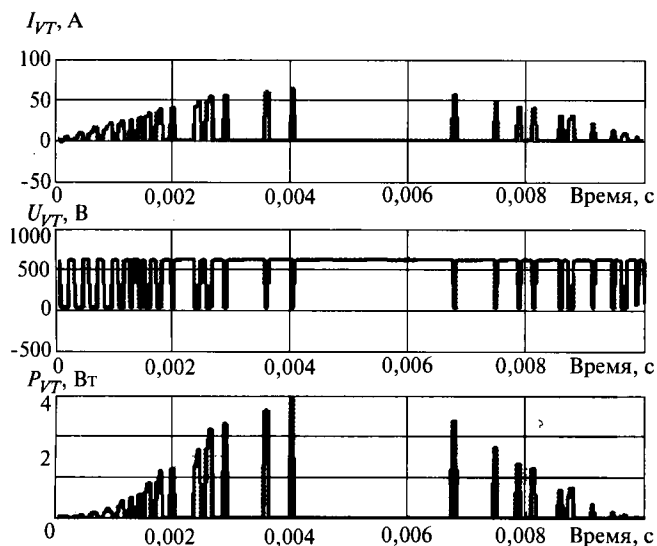


Рис. 7. Мгновенные ток, напряжение и мощность рассеяния полупроводникового ключа

аварийные режимы работы АП и оценить возможности их диагностики и т.д. Такая модель представлена на рис. 6.

Она содержит силовую часть АП (блоки Three-Phase Source, Three-Phase Series RLC Branch, Universal Bridge) с блоками измерения и задания тока нагрузки, систему управления АП (затемнённая часть) с блоком преобразования системы координат (ху\_АВС) и релейными регуляторами тока (Hist Control), и измерительную часть (пунктир на рис.6). Статические и динамические характеристики, полученные на виртуальной модели, совпадают с характеристиками, полученными аналитически и на структурной модели (рис. 3, 5). Мгновенные ток и напряжение, а также мгновенная мощность рассеяния полупроводникового ключа инвертора, полученные на модели, представлены на рис. 7.

Гармонический состав тока в сети, полученный на модели, представлен таблицей.

Номер гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амплитуда тока сети, А	61,63	0,13	0,06	0,24	0,14	0,11	0,24	0,06	0,16	0,1

## Выводы

1. Теоретические результаты исследования АП, позволяющие оценить физические процессы при работе ВМЭП в двигательном и генераторном режимах, являются первым этапом проектирования. Эти исследования могут быть использованы при проверке адекватности модели и в учебном процессе при подго-

товке специалистов в области силовой электроники.

2. Структурная и виртуальная модели АП могут рассматриваться как макетные образцы для использования в научных и производственных лабораториях при проектировании источников питания с двухсторонней энергетической связью для мощных электроприводов.

## Список литературы

1. Герман-Галкин С.Г., Гаврилов Р.С. Энергетические свойства моментного электропривода пространственной стабилизации опорно-поворотного устройства // Материалы Международной конференции «Экстремальная мехатроника и робототехника». Дзубга, 2009.
2. Герман-Галкин С. Исследование активного управляемого выпрямителя в пакете Sim Power System // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. № 11.
3. Герман-Галкин С. Исследование электрических характеристик сетевого инвертора с ШИМ в пакете ТСАД // ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. Системы электроснабжения, электротехнические установки и комплексы. Киев, 1999.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Ч.2. Новосибирск, 2000.
5. Розанов Ю.К. Силовая электроника. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
6. Герман-Галкин С.Г. MATLAB & SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК: Учебное пособие для вузов. СПб: Корона-Век, 2008.
7. Э.Чехет, В. Соболев, С. Полищук. Современные тенденции построения 4-х квадрантных преобразователей частоты для электропривода // Proc. Of the 3-rd Scient. And Techn.Confer. Unconventional Elektromechanical and Elektrotechnical Systems. Alushta, Ukraine, 1997. Vol. 1.
8. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода // Электричество. 2000. № 3.
9. N. Mohan, T. Underland, W. Robbins. Power electronics // Converters, Applications, and Design. New York, 1995.
10. Булгаков А. А. Основы динамики управляемых вентиляционных систем. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
11. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970.
12. Слежановский О.В., Дашковский Л.Х., Кузнецов И.С. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентилями преобразователями. М.: Энергоатомиздат, 1983.

**Герман-Галкин Сергей Германович** — профессор кафедры «Мехатроники и робототехники» БГТУ (ВОЕН-МЭХ) им. Д.Ф. Устинова, доктор техн. наук, проф. Окончил Ленинградский электротехнический институт связи (ЛЭИС) им. М.А. Бонч-Бруевича в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию в 1984 г.

**Гаврилов Роман Сергеевич** — аспирант БГТУ (ВОЕН-МЭХ) им. Д.Ф. Устинова, работает в КБ Специального машиностроения, СПб. Окончил БГТУ в 2007 г. по специальности «Мехатроника и робототехника».

## Исследование асинхронных двигателей насосов водяных скважин

МУСТАФАЕВ Р.И., САИДОВ Р.А.

Предложена цифровая трёхфазная модель погружного асинхронного электропривода насосов водяных скважин, удобная для моделирования на персональных компьютерах. Исследованы симметричные и несимметричные режимы работы. Выявлено, что последствия амплитудно-фазовой несимметрии напряжений более негативны, чем с чисто амплитудной несимметрией при прочих равных условиях.

**Ключевые слова:** погружной асинхронный двигатель, насос, водяная скважина, цифровая трёхфазная модель, амплитудная несимметрия, амплитудно-фазовая несимметрия.

В связи с развитием искусственного водоснабжения погружные электронасосы водяных скважин находят все более широкое применение для добычи воды, которая в зависимости от химического и физического состава может применяться для полива сельскохозяйственных культур, технических и бытовых нужд населения и т.д.

В связи с этим вопросы надёжности, устойчивости и экономичности погружных электродвигателей приобретают первостепенное значение. Для решения этих актуальных вопросов необходимо провести комплекс исследований статических и динамических режимов работы этих установок при различных возмущающих воздействиях. Естественно, проведение этих исследований в натуральных условиях требует значительных затрат. Поэтому разработка адекватной математической цифровой модели, так называемой модели состояния, позволит исследовать комплекс статических и динамических характеристик указанных электродвигателей при варьировании различных возмущающих воздействий (изменения момента сопротивления, напряжения, несимметрии и т.д.). Причём для исследования всего комплекса возникающих вопросов модель должна быть более полной, чем широко применяемые математические модели асинхронных электропри-

The digital three-phase model of submersible asynchronous electric drive of water holes' pumps, presented in a suitable form for modeling on personal computers, has been offered. The symmetrical and asymmetrical operating conditions have been studied. It was determined, that the consequences of amplitude-phase asymmetry of voltages were more negative ones in comparison with pure amplitude asymmetry under other equal conditions.

**Key words:** submersible asynchronous motor, pump, water hole, digital three-phase model, amplitude asymmetry, amplitude-phase asymmetry.

водов, базирующиеся на двухкоординатном представлении—неподвижных в пространстве осях  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0 и синхронно-вращающихся осях  $\alpha_s$  и  $\beta_s$ , вращающихся со скоростью ротора  $d$ ,  $q$  и т.д.

В [1] приведены в общем виде уравнения асинхронных машин в трёхфазной неподвижной системе координат. Эти уравнения в матрично-векторной форме [2], приведённые к удобному для решения на персональных компьютерах виду, для исследуемого объекта имеют:

$$[p\psi_s] = [A_s][i_s] + [U_s];$$

$$[p\psi_r] = [A_\omega][\psi_r] + [A_r][i_r];$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{xs} & B_{xm} \\ B_{xm} & A_{xr} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix}, \\ \text{где } p\psi_s &= \begin{bmatrix} p\psi_{s\alpha} \\ p\psi_{s\beta} \\ p\psi_{s\gamma} \end{bmatrix}; \quad p\psi_r = \begin{bmatrix} p\psi_{r\alpha} \\ p\psi_{r\beta} \\ p\psi_{r\gamma} \end{bmatrix}; \quad \psi_s = \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{s\gamma} \end{bmatrix}; \\ \psi_r &= \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \psi_{r\gamma} \end{bmatrix}; \quad i_s = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{s\gamma} \end{bmatrix}; \quad i_r = \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{r\gamma} \end{bmatrix}; \quad U_s = \begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{s\beta} \\ U_{s\gamma} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$U_r = \begin{bmatrix} U_{r\alpha} \\ U_{r\beta} \\ U_{r\gamma} \end{bmatrix}; A_s = \begin{bmatrix} -r_{s\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{s\beta} & 0 \\ 0 & 0 & -r_{s\gamma} \end{bmatrix};$$

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\omega_r}{\sqrt{3}} & \frac{\omega_r}{\sqrt{3}} \\ \frac{\omega_r}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{\omega_r}{\sqrt{3}} \\ -\frac{\omega_r}{\sqrt{3}} & \frac{\omega_r}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_r = \begin{bmatrix} -r_{r\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{r\beta} & 0 \\ 0 & 0 & -r_{r\gamma} \end{bmatrix};$$

$$A_{xs} = \begin{bmatrix} x_{s\alpha} & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_{s\beta} & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_{s\gamma} \end{bmatrix};$$

$$A_{xr} = \begin{bmatrix} x_{r\alpha} & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_{r\beta} & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_{r\gamma} \end{bmatrix};$$

$$B_{xm} = \begin{bmatrix} x_m & -0,5x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & x_m & -0,5x_m \\ -0,5x_m & -0,5x_m & x_m \end{bmatrix}.$$

К уравнениям (1) баланса напряжений, потокосцеплений и токов по осям  $\alpha, \beta, \gamma$  необходимо добавить уравнения момента и движения:

$$m_{\text{эм}} = \frac{\sqrt{3}}{2} p_m x_m [(i_{s\alpha} i_{r\gamma} + i_{s\beta} i_{r\alpha} + i_{s\gamma} i_{r\beta}) - (i_{s\alpha} i_{r\beta} + i_{s\beta} i_{r\gamma} + i_{s\gamma} i_{r\alpha})]; \quad (2)$$

$$\frac{J}{p_m} p \omega_r = m_{\text{эм}} - m_c. \quad (3)$$

В соответствии с [3] момент сопротивления центробежного водяного насоса

$$m_c = m_0 + k_m \omega_r^2. \quad (4)$$

Системы уравнений (1)–(4) составляют трёхфазную математическую модель в неподвижных координатах  $\alpha, \beta, \gamma$  асинхронного электропривода погружных насосов. Здесь  $p = d/dt$  – символ дифференцирования по синхронному времени  $\tau = 314t$  рад;  $p_m$  – число пар полюсов;  $r_s, r_r, x_s, x_r, x_m$  – активные и полные индуктивные сопротивления статорных ( $s$ ) и

роторных ( $r$ ) контуров и сопротивления взаимной индукции с индексами, указывающими на оси  $\alpha, \beta, \gamma$ ;  $\omega_r$  – частота вращения ротора;  $J$  – момент инерции привода. Уравнения представлены в относительных единицах (базовые параметры приведены в приложении).

В сопротивления  $r_s$  и  $x_s$  должны входить предвключённые сопротивления погружного кабеля и трансформатора, расположенного у устья скважины, при его наличии.

На указанной модели были исследованы следующие режимы работы указанных электроприводов: симметричный трёхфазный режим, работа при амплитудной несимметрии напряжения, при амплитудно-фазовой несимметрии напряжений и неполнофазный режим (при обрыве одной из фаз питающего двигателя напряжения).

Моделирование было проведено на двигателе мощностью 11 кВт, параметры которого приведены в приложении. Развёрнутая система уравнений с цифровыми данными (цифровая модель) приведена в приложении. При исследовании симметричного режима составляющие вектора сетевого напряжения  $U_s$  определяются в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_{s\alpha} &= 1 \cdot \sin(\tau); \\ U_{s\beta} &= 1 \cdot \sin(\tau - 2,094); \\ U_{s\gamma} &= 1 \cdot \sin(\tau + 2,094), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\varphi_1 = 2,094$  – угол сдвига, рад.

На рис. 1 приведены кривые изменения электромагнитного момента  $m_{\text{эм}}$ , частоты вращения ротора  $\omega_r$  и токов статора  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}$  при пуске и нагрузке на валу, равной примерно 70% номинальной в установившемся режиме. Из флюктограмм видно, что момент устанавливается на отметке 1,12, что соответствует примерно 70% загрузке двигателя погружного насоса. Токи  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}$  симметричны и равны друг другу,  $i_{s\alpha} = 0,465$ . Так как в кривой момента  $m_{\text{эм}}$  в установившемся режиме нет колебаний, то режим является строго симметричным.

Далее были исследованы несимметричные режимы работы погружного асинхронного электропривода водяного насоса. При этом различают два вида несимметрии напряжения: чисто амплитудная, при которой меняются только значения фазных напряжений, а углы между ними остаются неизменными и равными  $\varphi_1 = 2,094$  рад (рис. 2, а); амплитудно-фазовая несимметрия, при которой меняются зна-

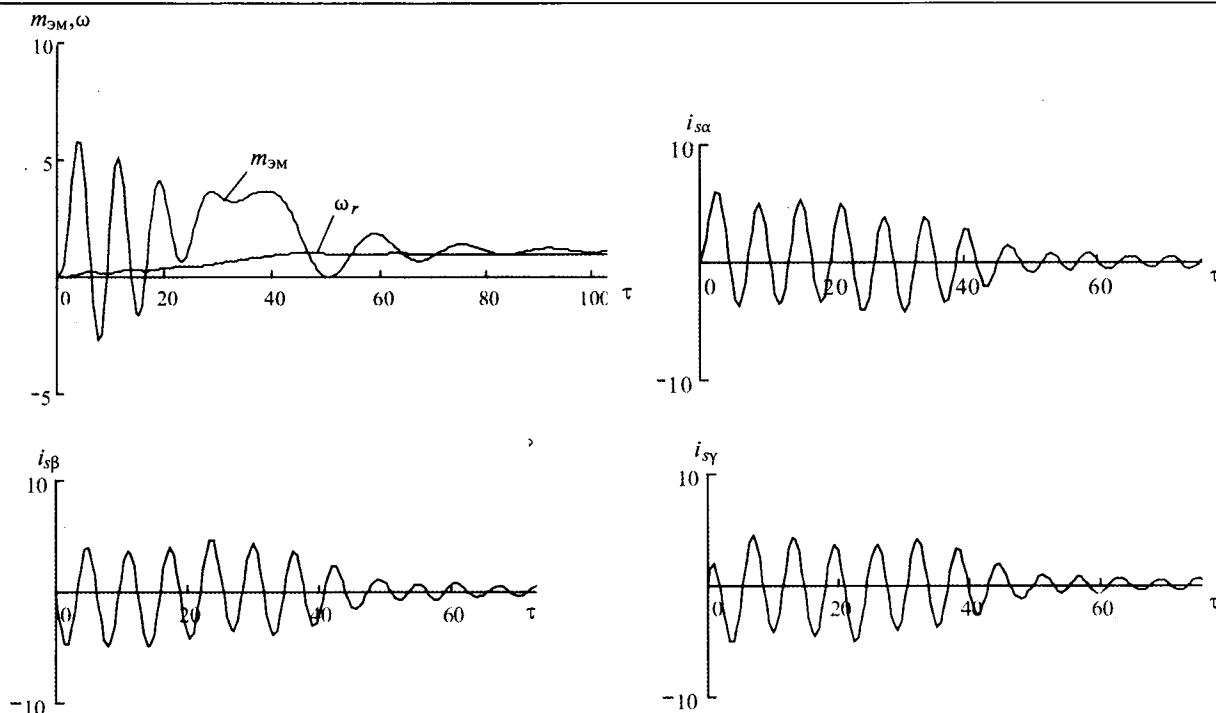


Рис. 1

чения как фазных напряжений, подводимых к двигателю, так и углов между ними (рис. 2,б).

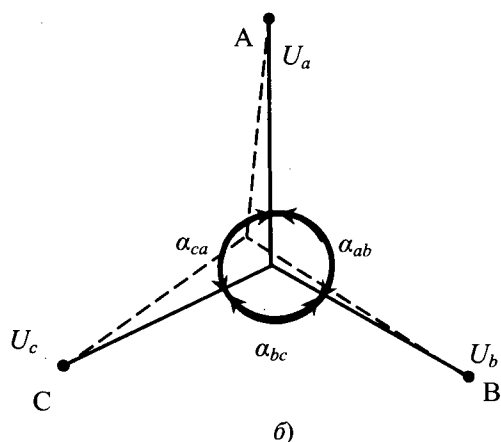
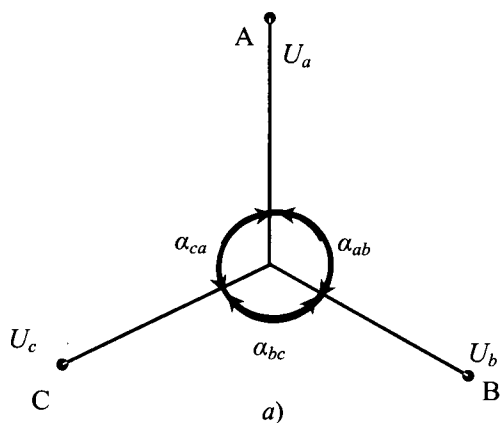


Рис. 2

Исследуем в начале амплитудную несимметрию. В соответствии с рис. 2,а, составляющие вектора напряжения

$$\left. \begin{aligned} U_{s\alpha} &= 1,1 \sin(\tau); \\ U_{s\beta} &= 0,85 \sin(\tau - 2,094); \\ U_{sy} &= 1,03 \sin(\tau + 2,094). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

На рис. 3 представлены кривые изменения электромагнитного момента  $m_{ЭМ}$ , частоты вращения  $\omega_r$ , а также токов  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$ ,  $i_{sy}$  при чисто амплитудной несимметрии. Флюктограммы показывают, что при этом в кривой момента в установившемся режиме появляется переменная составляющая, равная  $\pm 80\%$  от установившегося значения, которое равно  $m_{ЭМ.уст} = 1,125$ , скольжение остаётся практически неизменным. В этом режиме увеличиваются токи двигателя, которые составляют  $i_{s\alpha} = 1,27$  о.е.;  $i_{s\beta} = 0,8$  о.е.;  $i_{sy} = 0,77$  о.е., т.е. ток фазы А на 27% перегружен, хотя в двух других фазах при этой же нагрузке токи не достигают номинальных значений.

На рис. 4 представлены флюктограммы изменения режимных параметров двигателя при амплитудно-фазовой несимметрии (рис.2,б). При этом для удобства сопоставительного анализа амплитуды составляющих векторов напряжения были оставлены такими же, как и в уравнении (6), но при этом изменены фазовые углы между ними. Таким образом,

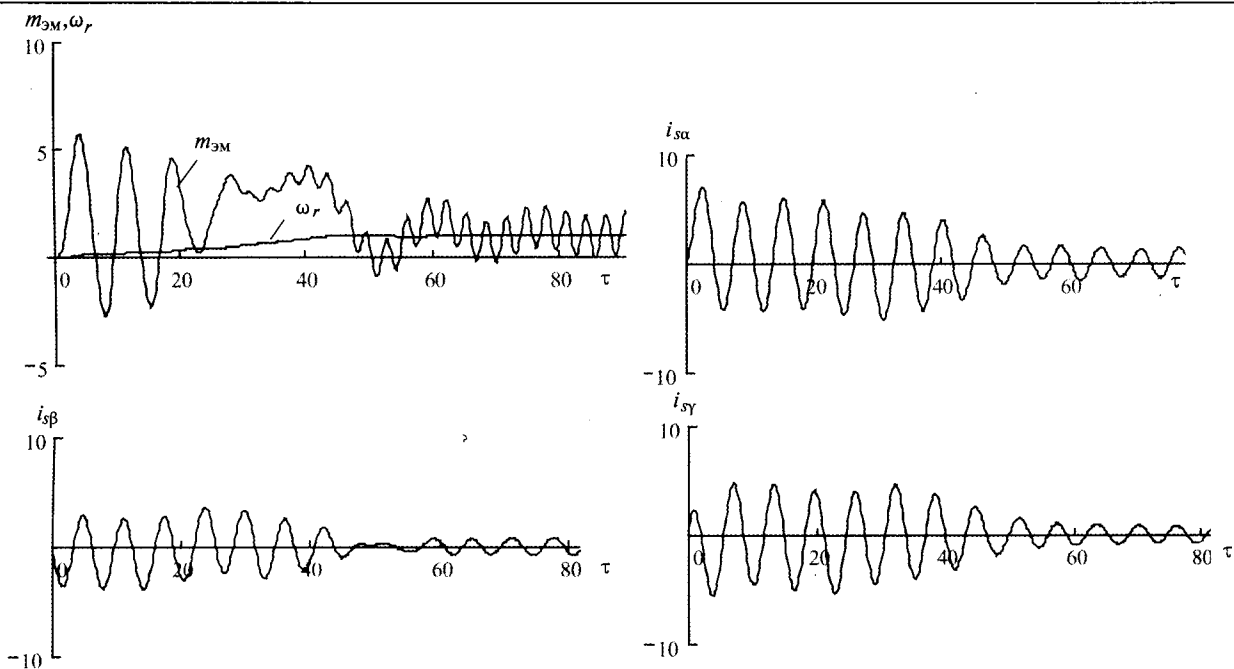


Рис. 3

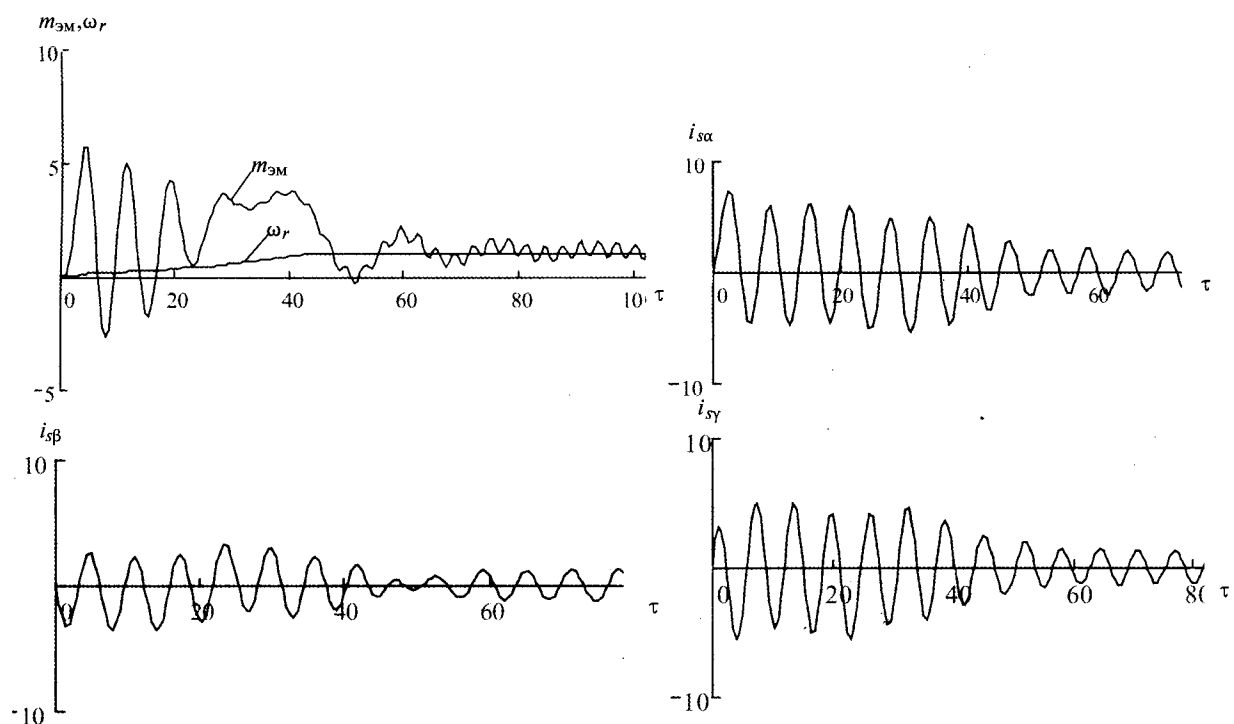


Рис. 4

$$\left. \begin{aligned} U_{s\alpha} &= 1,11 \sin(\tau); \\ U_{s\beta} &= 0,85 \sin(\tau - 2,07); \\ U_{sy} &= 1,03 \sin(\tau + 1,94). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Анализ флюктограмм показывает, что при такой несимметрии колебания в кривой момента при установившемся режиме не превышает  $\pm 20\%$  от установившегося значения, но в

этом режиме существенно увеличиваются токи двигателя:  $i_{s\alpha} = 1,7$  о.е.;  $i_{s\beta} = 1,2$  о.е.;  $i_{sy} = 1,2$  о.е. при нагрузке двигателя, не превышающей 70% от номинальной.

И, наконец, был исследован неполнофазный режим работы, когда происходит обрыв одной из фаз, питающей двигатель. Этот режим моделируется резким увеличением активного сопротивления фазы статорной обмотки

двигателя. На рис. 5 представлены флюктограммы этого режима при увеличении в 100 раз  $r_{s\beta}$  на интервале от 200 до 300 рад. При этом на этом интервале (обрыв фазы  $B$ ) токи в других фазах увеличиваются практически более чем на 50%, ток в фазе  $B$ , естественно, равен нулю, колебания момента составляют  $\pm 40\%$ .

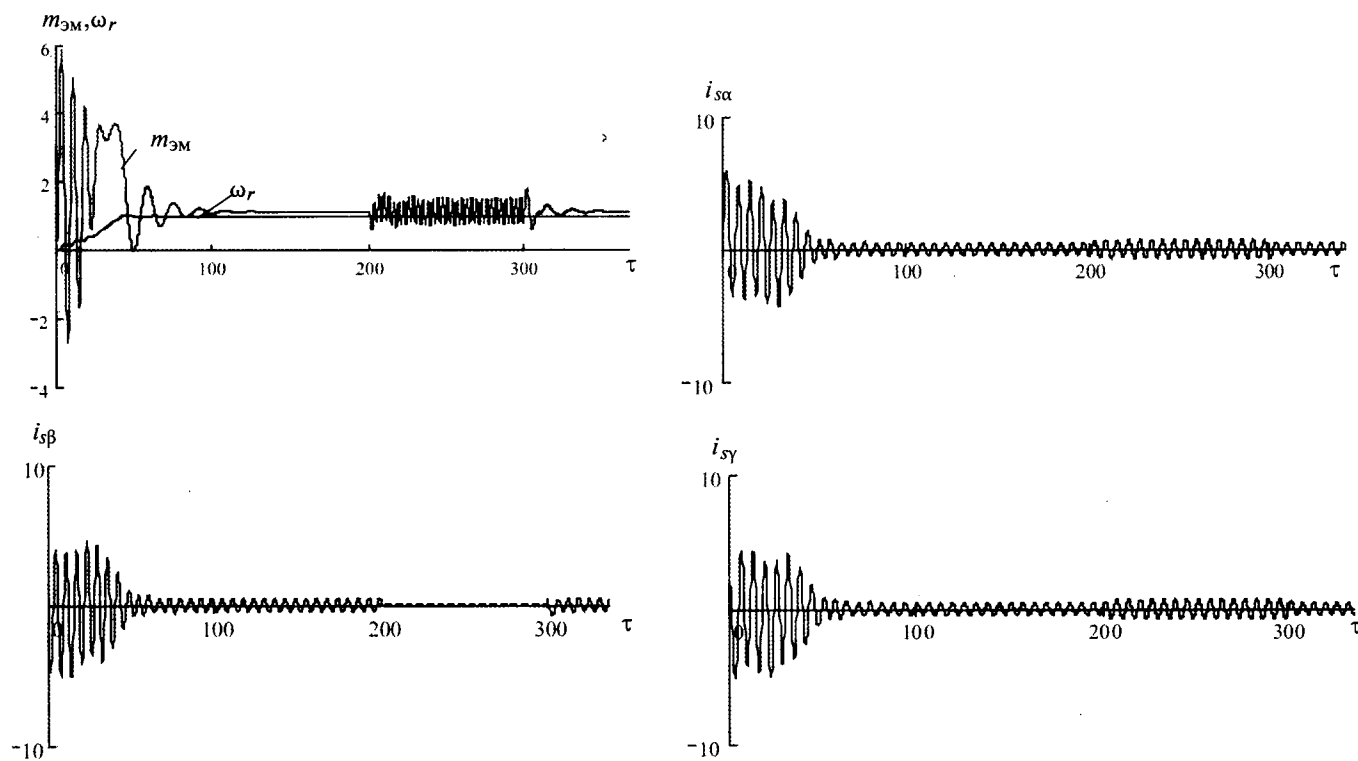


Рис. 5

### Выводы

1. Для исследования несимметричных и неполнофазных режимов работы асинхронных электроприводов водяных скважин целесообразно использовать предлагаемую трёхфазную цифровую модель двигателя, уравнения которой записаны в неподвижных в пространстве координатах  $\alpha, \beta, \gamma$ , и которая приведена к виду, удобному для решения на персональном компьютере.

2. Из сопоставительного анализа кривых изменения режимных параметров двигателя при пуске и установившемся режиме следует, что при чисто амплитудной несимметрии напряжения, подводимого к статорной обмотке двигателя, колебания момента достигают больших значений и несколько увеличиваются фазные токи, при амплитудно-фазовой несимметрии колебания момента незначительны (не превышают 20%), но существенно повышают-

ся токи, которые даже при 70% загрузке двигателя превышают номинальные значения (в фазе  $A$  существенно).

3. При имитации неполнофазного режима возникают колебания момента двигателя, которые составляют  $\pm 40\%$  (в режиме 70% загрузки) при этом токи в «здоровых» фазах увеличиваются более чем на 50%.

### Приложение

Данные двигателя:  $P_H=11\text{ кВт}$ ;  $M_H=72\text{ Н·м}$ ;  $\eta=0,875$ ;  $\cos\varphi=0,87$ ;  $U_{H.\phi}=220\text{ В}$ ;  $I_{H.\phi}=21,53\text{ А}$ ;  $R_1=0,462\text{ Ом}$ ;  $R_2=0,312\text{ Ом}$ ;  $x_{\sigma 1}=0,83\text{ Ом}$ ;  $x_{\sigma 2}=1,26\text{ Ом}$ ;  $x_m=27,5\text{ Ом}$ ;  $s_H=0,028$ ;  $2p_m=4$ ;  $J_{\text{рот}}=0,04\text{ кг·м}^2$ ;  $J_{\text{мех}}=0,065\text{ кг·м}^2$ .

Базисные величины:  $U_{\text{баз}}=\sqrt{2}U_{H.\phi}=310\text{ В}$ ;  $I_{\text{баз}}=\sqrt{2}I_{H.\phi}=30,44\text{ А}$ ;  $R_{\text{баз}}=10,2\text{ Ом}$ ;  $\psi_{\text{баз}}=U_{\text{баз}}/\omega_{\text{баз}}=0,987\text{ Ом}$ ;  $\omega_{\text{баз}}=314\text{ 1/с}$ ;  $P_{\text{баз}}=3/2 U_{\text{баз}} \times I_{\text{баз}}=14154\text{ Вт}$ ;  $M_{\text{баз}}=P_{\text{баз}}/\omega_{\text{баз}}=45,1\text{ Н·м}$ ;  $J_{\text{баз}}=M_{\text{баз}}/\omega_{\text{баз}}=0,46 \cdot 10^{-3}$ .

Сопротивления в относительных величинах:  $x_{\sigma s}=0,0814$ ;  $x_{\sigma r}=0,1237$ ;  $x_m=2,696$ ;  $x_s=2,78$ ;  $x_r=2,82$ ;  $r_s=0,045$ ;  $r_r=0,03$ .

Коэффициенты момента сопротивления:  $m_0=0,2$ ,  $k_m=1$ .

### Список литературы

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1987.

2. **Мустафаев Р.И.** Об универсальной структуре математической модели электрических машин // Изв. вузов. Электромеханика. 1989. № 4. С. 33–39.

3. **Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984.

**Мустафаев Рауф Исмаил оглы** — заведующий отделом «Альтернативные источники энергии и экология» АзНИПИИ энергетики, доктор техн. наук, проф., академик Международной академии электротехнических наук. Окончил электроэнергетический факультет Московского агротехнического университета в 1964 г. Защитил докторскую диссертацию по

теме «Динамические режимы электромеханических преобразователей ветроэлектрических установок, работающих на электрическую сеть» в МЭИ в 1990 г.

**Саидов Расим Азим оглы** — доцент кафедры «Электротехника» Азербайджанского технологического университета, доктор техн. наук. Окончил факультет электрификации Азербайджанской сельскохозяйственной академии в 1973 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Повышение эксплуатационной надёжности и эффективности работы электродвигателей водяных скважин» в 2009 г.

---

## ХРОНИКА

---

### *Международная номинация в электротехнике*

Более 125 лет прошло с момента создания крупнейшей международной общественной организации IEEE (Институт инженеров электротехники и электроники), объединяющей в настоящее время 385000 членов из 160 стран. IEEE публикует 30% всей мировой технической литературы, посвящённой современным технологиям и развитию электротехники, электроники и энергетики. При её участии создано более 900 промышленных стандартов в этих областях. Ежегодно IEEE проводит около 400 конференций, посвящённых новейшим достижениям в этих областях в различных странах мира.

Существует большое количество наград IEEE за достижения в каких-либо областях электротехники и электроники. Одной из наиболее престижных является степень Fellow IEEE, которая присуждается 0,1% общей численности членов IEEE. В январе 2011 г. степень Fellow была присуждена 321 члену IEEE, в том числе одному из российской секции — Юрию Константиновичу Розанову за вклад в электротехническое образование.

Ю.К. Розанов издал свой первый учебник «Основы преобразовательной техники» в 1979 г. Он был написан для учащихся техникумов, но пользовался большим спросом среди специалистов в этой области и у студентов высших учебных заведений электротехнических специальностей. В 1985 г. учебник был

переведён и издан в ЧССР. В 2001 г. Ю.К. Розанову присуждено звание «Заслуженный деятель науки» РФ.

За учебник «Электрические и электронные аппараты» в 2002 г. Ю.К. Розанову, являющемуся руководителем коллектива авторов, присуждена премия Правительства РФ в области науки, а в 2005 г. — премия Правительства РФ в области образования за участие в написании учебника «Основы современной энергетики»

С 1989 по 2004 гг. Ю.К. Розанов заведовал кафедрой «Электрические и электронные аппараты» МЭИ(ТУ). По его инициативе было сформировано новое учебное направление «Силовые электронные аппараты». В 2009 г. им создан учебник для вузов «Силовая электроника», который пользуется большим успехом среди студентов вузов и специалистов в этой области. Под его руководством 14 человек защитили кандидатские диссертации в областях электротехники и силовой электроники.

Ю.К. Розанов был одним из инициаторов создания Отделения российской секции IEEE по электротехнике, силовой электронике и энергетике, которую продолжает возглавлять и в настоящее время.

**Воронай Н.И., чл.-кор.РАН, Fellow IEEE,  
Беспалов В.Я., проф., Senior IEEE**



### Исаак Яковлевич Браславский

(к 75- летию со дня рождения)

12 мая 2011 г. исполняется 75 лет со дня рождения и 50 лет научно-педагогической деятельности в Уральском федеральном университете (УрФУ), ранее УГТУ-УПИ, доктора технических наук, профессора, заслуженного работника высшей школы России, действительного члена Академии электротехнических наук РФ, заведующего кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» УрФУ.

После окончания в 1958 г. с отличием Уральского политехнического института и работы в течение трёх лет старшим инженером лаборатории автоматики Нижне-Тагильского металлургического комбината И.Я. Браславский в 1961 г. поступил в аспирантуру на кафедру «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского ГТУ. Его дальнейшая трудовая деятельность связана с этой кафедрой, на которой он работал аспирантом, ассистентом, доцентом, а с 1987 г. возглавил её. В 1965 г. И.Я. Браславский защитил кандидатскую диссертацию, в 1986 г. — докторскую.

Профессор И.Я. Браславский хорошо известен как крупный учёный в области автоматизированного электропривода. Он создал научную школу асинхронного полупроводникового электропривода массового применения, управляемого напряжением. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований, выполненный И.Я. Браславским, позволил разработать и внедрить на различных производственных механизмах (в ряде случаев впервые в отечественной практике) рациональные структуры асинхронных электроприводов указанного класса с расширенными техническими и функциональными возможностями.

Разработанные под руководством и при непосредственном участии И.Я. Браславского тиристорные системы для управления



асинхронными двигателями, регулируемые напряжением, были приняты к промышленному производству Министерством электротехнической промышленности СССР.

В последнее время под руководством И.Я. Браславского успешно развивается актуальное научное направление, связанное с созданием энергосберегающих технологий на основе регулируемых асинхронных электроприводов.

И.Я. Браславский — автор более 400 научных работ, в том числе 6 книг, 8 брошюр, 17 авторских свидетельств на изобретения, более 40 статей и докладов, опубликованных за рубежом.

Под его научным руководством в Екатеринбурге проведено 13 Всероссийских (Всесоюзных) конференций по проблеме электропривода переменного тока, с 1995 г. ставших международными. Он — член оргкомитета Всероссийских (Всесоюзных) конференций по автоматизированному электроприводу, а также ряда международных зарубежных конференций по электроприводу и промышленной электронике.

И.Я. Браславский ведёт большую работу по совершенствованию учебного процесса, подготовке инженерных и научно-педагогических кадров, развитию и модернизации материально-технической базы кафедры. За время его руководства кафедрой выпущено более 2000 инженеров, успешно работающих на предприятиях Уральского и других регионов России.

Под его научным руководством защищено 22 кандидатских и одна докторская диссертации. Он читал лекции в Болгарии и Германии.

В течение многих лет И.Я. Браславский входил в состав президиума правления Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников, работал заместителем председателя Уральского отделения Академии электротехнических наук России, председателем Свердловского областного комитета по автоматизированному электроприводу.

И.Я. Браславский — член Научно-методической комиссии специальности 140406 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» УМО по энергетическим и электротехническим специальностям.

Большой вклад И.Я. Браславского в развитие отечественного электропривода отмечен медалью «За заслуги в электротехнике» Академии электротехнических наук РФ. Он также награждён медалью «Изобретатель СССР» и знаком «За активную работу в НТО».

Различные модификации разработанных Исааком Яковлевичем систем асинхронного электропривода неоднократно экспонировались на всесоюзных и международных выставках и были отмечены дипломами и наградами.

Редакция и редакционная коллегия журнала «Электротехника» поздравляют Исаака Яковлевича с юбилеем и желают ему доброго здоровья и творческих успехов.

# Вячеслав Григорьевич Огоньков

(к 70 - летию со дня рождения)

14 апреля 2011 г. исполняется 70 лет Вячеславу Григорьевичу Огонькову.

Свою трудовую биографию Вячеслав Григорьевич Огоньков начал в 1959 г. в лаборатории изоляции высоковольтных электрических машин Всесоюзного электротехнического института им. В.И.Ленина. В 1974 г. коллектив специалистов по электроизоляционной технике был переведён во вновь образованный Всесоюзный научно-исследовательский институт электроизоляционных материалов (ВНИИЭИМ). Во ВНИИЭИМ В.Г. Огоньков работал до 1990 г. заместителем директора по научной работе, первым заместителем директора по научной работе, с 1990 по 1991 гг. возглавлял институт.

Без отрыва от производства в 1973 г. Вячеслав Григорьевич окончил Московский энергетический институт, а в 1982 г. — аспирантуру ВЭИ им. В.И. Ленина и в том же году защитил во ВНИИ КП диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук. В.Г.Огоньков принимал активное участие в работах по исследованию новых стеклослюдинитовых материалов и разработке новой технологии изготовления стержневых и катушечных обмоток машин и генераторов. Результаты этих работ использованы при разработке новых систем терморезистивной изоляции: монолит-2 и монотерм, которые были применены для обмоток высоковольтных электрических машин, турбогенераторов и внедрены на многих электромашиностроительных заводах. Изоляция монолит-2 использовалась также для тяговых электродвигателей.

В.Г.Огоньков руководил исследованиями по совершенствованию систем изоляции электрических машин, созданию отечественного технологического оборудования для производства электротехнических и фольгированных материалов, по техническому перевооружению электроизоляционных заводов.



Вячеслав Григорьевич является одним из создателей АО «Международный концерн «Ламинат», которое в 1982 г. объединило более 150 предприятий и научных организаций электротехнической, электронной, радиотехнической, авиационной и других отраслей промышленности России, Украины, Белоруссии и Молдавии. Эта организация в период перестройки позволила промышленности гибко перейти к условиям рыночной экономики, сохранить научный потенциал, производство и разработку новых фольгированных и электротехнических электроизоляционных материалов. В концерне «Ламинат» Владимир Григорьевич работал с 1992 по 1995 гг. вице-президентом, исполнительным директором Московского представительства, а с 1995 по 1999 гг. — членом Совета директоров. В 1994 г. он создал ЗАО «Научно-производственная фирма «Росламинат», учредителями которого явились АОЗТ завод «Молдавизолит» (г. Тирасполь), ЗАО «Электроизолит» (г. Хотьково) и др. В ЗАО НПФ «Ламинат» В.Г.Огоньков работал с 1994 по 1996 гг. генеральным директором, с 1996 по 2001 гг. председателем Совета директоров. В 1994—1997 гг. совместно с работниками нефтяной промышленности, была проведена работа по созданию конструкции и технологии изготовления комбинированных стеклопластиковых труб

для промышленных трубопроводов нефтегазовых месторождений.

Результаты инженерных и научных исследований В.Г.Огонькова отражены более чем в 100 печатных работах, включая 35 авторских свидетельств на изобретения в области электротехники. Более 75% авторских свидетельств успешно внедрены в производство.

В 1983 г. В.Г.Огонькову была присуждена Государственная премия СССР за разработку и внедрение в народное хозяйство широкого ассортимента электроизоляционных материалов на основе слюдинитовых бумаг. В 1998 г. Огоньков был удостоен премии Правительства РФ за разработку конструкции бипластмассовых стеклопластиковых труб и оборудования технологической линии по их изготовлению с организацией серийного производства 180 км труб в год для промышленных трубопроводов нефтегазовых месторождений.

С ЗАО «Электроизолит» (г. Хотьково) Вячеслава Григорьевича связывает многолетнее плодотворное сотрудничество. С 2004 г. В.Г. Огоньков является штатным научным консультантом ЗАО «Электроизолит» по электроизоляционным материалам и системам изоляции. При его непосредственном участии на предприятии разработан комплекс новых композиционных материалов для электрических машин, на основе которых разработаны системы электрической изоляции Термолит классов нагревостойкости F, H и C, внесены оригинальные решения по совершенствованию ряда элементов конструкции электрических машин, которые защищены девятью патентами и отражены в ряде публикаций, в том числе в журнале «Электротехника».

Вячеслав Григорьевич человек с активной жизненной позицией, полон энергии, сил и творческих замыслов.

Коллектив ЗАО «Электроизолит» поздравляет Вячеслава Григорьевича с юбилеем, желает здоровья, дальнейших творческих успехов.

**Требования к содержанию и оформлению статей  
журнала «Электротехника»**

**I. Содержание.**

**1. Введение.** Состояние вопроса, рассматриваемого в статье. Постановка задачи, её новизна и актуальность.

**2. Основное содержание.** Последовательное изложение существа рассматриваемого вопроса или решаемой задачи. При изложении избегать громоздких аналитических выражений, формул, расчётов и др. Основные аналитические соотношения представлять в обобщённой форме с указанием методов их решения. Оригинальные методы решения могут быть пояснены более подробно. Изложение желательно иллюстрировать соответствующими рисунками, схемами, диаграммами и др., максимально отражающими существо рассматриваемых вопросов.

**3. Моделирование и экспериментальная часть (если они есть).** Краткое описание математической или физической моделей. Оценка полученных результатов при моделировании.

**4. Заключение.** Выводы и значимость результатов для соответствующих областей науки и техники.

**5. Список литературы.** Приводится в конце статьи в порядке последовательности ссылок в тексте. Указываются:

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, наименование статьи или сборника, год издания, номер;

— для книг — фамилия и инициалы авторов, название книги, наименование издательства, город его нахождения, год издания.

В список литературы не должны включаться не напечатанные материалы и материалы для служебного пользования.

**6.** К статье должны быть приложены аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, а также название статьи на английском языке.

**II. Оформление.**

**1.** Объём статьи не должен превышать 12 страниц текста, набранного на компьютере через 2 интервала с полями 2–3 см и иметь не более 5–6 рисунков, сделанных с помощью компьютера (Word, Photoshop). Формулы должны быть набраны на компьютере в отдельные строки.

**2.** Статья должна сопровождаться письмом автора или организации, где она выполнена. К статье должны быть приложены сведения об авторах: фамилии, имена и отчества авторов, место работы, должности, учёные звания, степени, а также название вуза и факультета с указанием года его окончания. Необходимо указать контактные телефоны и электронные адреса.

**3.** Статья представляется в электронной форме по электронному адресу: [elektrotechnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotechnika@mtu-net.ru). или по почте с приложением CD-диска с текстом и рисунками.

*В соответствии с решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электротехника» включен в перечень ведущих научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.*