

ISSN 0013-5380

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

*С Новым годом!*

**1999**

**1**

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Секция теоретических основ электротехники, преобразовательной техники, электротехнических материалов

Бутырин П.А. (Объединенный институт высоких температур РАН), председатель секции, Булатов О.Г. (Московский энергетический институт), Козлов В.Н. (С.-Петербургский государственный технический университет), Лагарьков А.Н. (Объединенный институт высоких температур РАН), Макашкин Б.Д., ответственный секретарь редакции, Мионов В.Г. (Московский энергетический институт), Розанов Ю.К. (Московский энергетический институт), Чечурин В.Л. (С.-Петербургский государственный технический университет).

Научный редактор — Макашкин Б.Д.

### Секция электроэнергетики

Строев В.А., главный редактор, председатель секции (Московский энергетический институт), Дьяков А.Ф. (Корпорация «Единый электроэнергетический комплекс РФ»), Железко Ю.С. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), Ишкин В.Х. (РАО «ЕЭС России»), Кощеев Л.А. (Научно-исследовательский институт постоянного тока), Мамиконянц Л.Г. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), Никитин О.А. (РАО «ЕЭС России»), Семенов В.А. (ЦДУ ЕЭС России).

Научный редактор — Кудинова Л.С.

### Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов

Ларионов В.П., председатель секции (Московский энергетический институт), Александров Г.Н. (С.-Петербургский государственный технический университет), Белкин Г.С. (Всероссийский электротехнический институт), Полянин А.К. (Всероссийский электротехнический институт), царственная энергетическая академия).

Кудинова Л.С.

Электротехнических машин

1999, № 1.  
5732х.  
датель секции (Московский энергетический институт), государственный авиационный (институт) электроэнергетических процессов главного редактора журнала, Шапский институт электроэнергетики).

всеев Б.Н.

привода и автоматических процессов

Московский энергетический институт, государственный электротехнический институт, (Московский энергетический институт), техническое объединение «Антей»).

Б.Н.

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1  
ЯНВАРЬ  
1999

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение физико-технических проблем энергетики),  
ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ

## СОДЕРЖАНИЕ

Васильев Ю.С. Юбилей одной из крупнейших электротехнических школ России (К 100-летию Санкт-Петербургского государственного технического университета) . . . . .	2
Булычев А.В., Ванин В.К. Совершенствование защиты блока генератор—трансформатор от замыканий на землю . . . . .	9
Александров Г.Н. К расчету устройства ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях . . . . .	17
Павлов Г.М., Меркурьев А.Г., Шаргин Ю.М. Автоматическая частотная разгрузка в энергетических системах . . . . .	23
Забойн В.Н. Методология оптимизации параметров систем токосъема электрических машин . . . . .	28
Кучинский Г.С., Галахова Л.Н. Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными диэлектриками . . . . .	33
Андреев А.М., Канинский В.А., Полонский Ю.А. Исследование старения электроизоляционных материалов силовых кабелей и конденсаторов . . . . .	39
Мартыанов М.В., Попов В.В., Соколова Н.В. Информационные технологии для обеспечения надежности электрических машин . . . . .	45
Коровкин Н.В., Селина Е.Е. Анализ волновых процессов в системах с распределенными параметрами методом синтетических схем . . . . .	49

## ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Пятин Ю.М. Диспут о природе электрического тока . . . . .	59
---	----

## ХРОНИКА

Станислав Вячеславович Хватов (К 60-летию со дня рождения) . . . . .	61
--	----

## CONTENTS

Yu.S. Vasil'yev, Anniversary of One Major Electrical-Technical Schools of Russia (to Mark the 100th Anniversary of St.PSTU) . . . . .	2
A.V. Bulychev and V.K. Vanin, Improvement in the «Generator—Transformer» Unit Earth-Fault Protection. . . . .	9
G.N. Aleksandrov, On Calculating a Device for Limiting Short-Circuit Currents in Electrical Network . . . . .	17
G.M. Pavlov, A.G. Merkur'yev and Yu.M. Shargin, Automatic Frequency Load Shedding in Power Systems . . . . .	23
V.N. Zaboin, Methodology of the Optimizing the Parameters of Electrical Machine Brush Contact Systems . . . . .	28
G.S. Kuchinskii and L.N. Galakhova, Choice of Allowable Operating Strengths in Power Capacitors Impregnated with Ecology Safe Dielectric . . . . .	33
A.M. Andreyev, V.A. Kaniskin and Yu.A. Polonskii, Investigation of Ageing of Electrical Insulating Materials of Power Cables and Capacitors . . . . .	39
N.V. Mart'yanov, V.V. Popov and N.V. Sokolova, Information Technologies for Insuring the Reliability of Electrical Machines . . . . .	45
N.V. Korovkin and Ye.Ye. Selina, Analysis of Wave Processes in Systems with Distributed Parameters by the Method of Synthetic Schemes . . . . .	49
From the HISTORY of ELECTRICAL ENGINEERING Yu.M. Pyatin, Debate about Nature of Electrical Current . . . . .	59

## CHRONICLE

Stanislav Vyacheslavovich Khvatov (to Mark the 60th Anniversary) . . . . .	61
--	----

*Этот номер журнала посвящен юбилею Санкт-Петербургского государственного технического университета, ученые которого внесли весомый вклад в отечественную науку. Авторами большей части публикуемых ниже статей являются представители нынешнего поколения ученых электромеханического факультета СПбГУ.*

## Юбилей одной из крупнейших электротехнических школ России

*(К 100-летию Санкт-Петербургского государственного технического университета)*

ВАСИЛЬЕВ Ю.С.

19 февраля 1899 г. было принято правительственное постановление об организации Политехнического института в Петербурге. Рождение института было вызвано потребностями в инженерных кадрах для быстро развивавшейся экономики России. По инициативе министра финансов С.Ю.Витте были созданы Варшавский, Киевский и Санкт-Петербургский политехнические институты как «совершенно новые и своеобразные высшие учебные заведения», выпускающие инженеров широкого профиля, всесторонне развитых, обладающих глубокими знаниями в области общенаучных и общинженерных дисциплин, отлично знающих технику и умеющих применять свои знания в практической деятельности. Иными словами, уже при создании институт мыслился высшим учебным заведением нового типа — техническим университетом. В его создании приняли участие выдающиеся русские ученые Д.И. Менделеев, Д.К. Чернов, А.Н. Крылов, А.С. Попов и др.

Электромеханический факультет возник как электромеханическое отделение в числе первых четырех отделений Петербургского политехнического института [1]. Основные проблемы, относящиеся к созданию отделения, решались под руководством В.Л. Кирпичева при активной поддержке одного из основоположников техники переменных токов М.О. Доливо-Добровольского. Первым деканом электромеханического отделения стал проф. М.А. Шателен — известный русский электротехник, впоследствии Герой Социалистического Труда, член-корреспондент АН СССР.

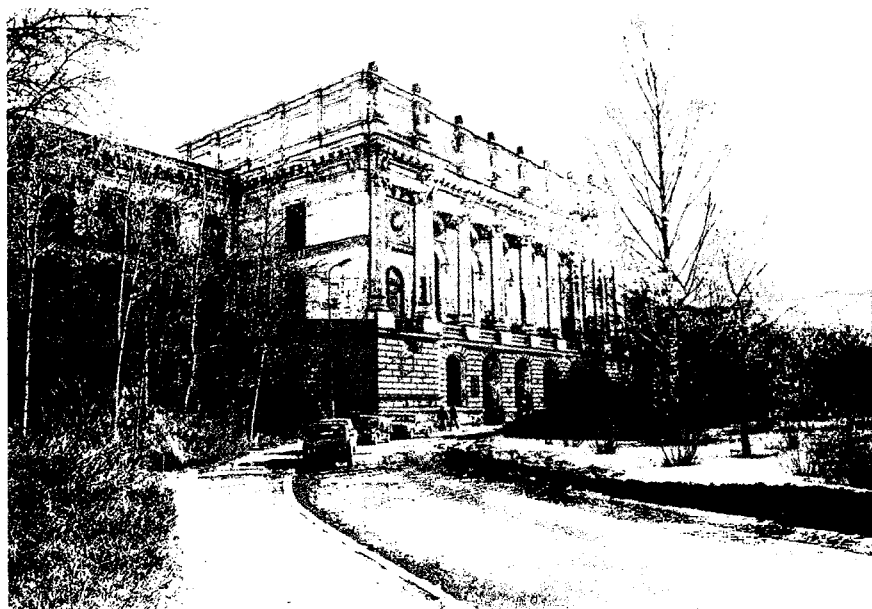
Первый набор студентов на электромеханическое отделение (58 чел.) был сделан в 1902 г. по двум специальностям: «Электроснабжение городов» и «Передача электрической энергии». Первый выпуск состоялся в 1907 г. Дипломы инженеров были вручены 23 выпускникам отделения. Диплом № 1 Санкт-Петербургского политехнического института был выдан А.А. Гореву,

впоследствии известному советскому электротехнику, ученому с мировым именем.

Учебный процесс на факультете с первых дней его существования строился на прогрессивных концепциях, предусматривающих фундаментальность физико-математической подготовки, единство теории и практики. В основу организации учебного процесса был положен принцип развития у студентов навыков к самостоятельному творчеству и инициативной работе. В учебных планах особое внимание уделялось самостоятельной работе. Так, из 35 ч в неделю аудиторных занятий (в среднем по факультету) 17 ч отводились для лекций, 18 ч — для практических занятий (упражнения, лаборатории и графические работы). Это соотношение на старших курсах изменялось в пользу практических занятий. Предусматривались экскурсии и практика на заводах России и за границей. Поощрялась творческая научная работа преподавателей и студентов. Все эти прогрессивные новшества, впоследствии прочно вошедшие в практику высшего образования нашей страны, в начале века отсутствовали в высших учебных заведениях Министерства просвещения России. Заметим, что Политехнический институт возник в системе Министерства финансов.

В годы советской власти факультет становится одним из крупнейших центров подготовки инженеров для электротехнической промышленности и электроэнергетики страны. В 20-е годы вводятся новые специальности: динамостроение (электрические машины), высокие напряжения (передача электрической энергии), центральные электрические станции (тепловые), гидротехнические установки, распределение и применение электрической энергии, электрическая тяга, радиотехника. К концу 20-х годов прием на факультет вырос до 500 ч. Для сравнения можно сказать, что за четверть века (с 1902 по 1927 гг.) было выпущено 704 инженера-электрика.

В 1930 г. факультет (после расформирования



Главное здание Санкт-Петербургского государственного технического университета

ЛПИ) выделился в самостоятельный институт — Ленинградский электромеханический институт (ЛЭМИ). При этом укрепилась техническая база и расширился преподавательский состав. К 1932 г. на кафедрах работали 36 профессоров, 93 доцента и 157 ассистентов. Подготовка велась по десяти специальностям: электрические машины, электрооборудование промышленных предприятий, электрическая тяга, тепловые электрические станции, гидроэлектростанции, техника высоких напряжений, электрические измерения, электрические кабели, аппаратостроение и экономика. Уже к середине 30-х годов задача увеличения выпуска специалистов была практически решена. Так, в 1931 и 1932 гг. ЛЭМИ был выпущен 541 инженер. Самостоятельно ЛЭМИ существовал до 1934 г., когда снова стал электромеханическим факультетом в составе Ленинградского индустриального института, переименованного в ноябре 1940 г. в Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина.

Великая Отечественная война внесла суровые коррективы в учебный процесс. Резко сократилась численность студентов — многие ушли на фронт, в боевые воинские формирования и отряды Народного ополчения. В первые дни войны в ЛПИ были созданы Курсы стрелков-радиостов для бронетанковых войск, от которых ведет свою историю Высшее военно-инженерное училище связи. Костяк курсов составили преподаватели электромеханического и физико-математического факультетов, начальником стал блестящий организатор доцент ЭМФ Г.П. Александров.

Большая часть факультета была эвакуирована. Из состава факультета, переведенного в Ташкент,

под руководством М.А. Шателена был организован Энергетический институт республиканского филиала АН СССР, на базе которого впоследствии была создана Академия наук Узбекской ССР.

Послевоенные годы стали годами бурного развития электромеханического факультета. Страна остро нуждалась в высококвалифицированных кадрах. В сжатые сроки на факультете были восстановлены учебные лаборатории, укреплен научно-педагогический состав, упрочились связи с промышленностью. В 1948 г. факультет стал инициатором патриотического начинания — создания первых студенческих строительных отрядов, работающих на строительстве колхозных ГЭС и электрификации сел Ленинградской области. В этот пе-

риод факультет сформировался как крупный центр подготовки специалистов широкого профиля, имеющий сбалансированный набор электротехнических специальностей, высококвалифицированные научно-педагогические кадры и современную материально-техническую базу. Прием на факультет составлял 475 чел., подготовка специалистов велась на 12 кафедрах.

В 1976 г. из состава электромеханического факультета были выделены кафедры автоматики и телемеханики, информационно-измерительной техники, электропривода и автоматизации промышленных установок, ставшие основой нового факультета технической кибернетики.

Сейчас факультет составляют 9 кафедр: «Электрические машины», «Электрические станции», «Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы», «Электрические и электронные аппараты», «Электрические системы и сети», «Энергосбережение и электрификация», «Инженерная электрофизика и техника высоких напряжений», «Электротехника и электротехнология» и «Теоретические основы электротехники». Руководители кафедр — видные ученые, доктора технических наук, профессора: заслуженный деятель науки и техники России В.В. Попов, В.К. Ванин, Ю.А. Полонский, чл.-корр. РАН Г.Н. Александров, С.В. Смолвик, Ю.Н. Бочаров, академик РАН В.А. Глухих, С.В. Дресвин, В.Н. Боронин. На факультете работают 150 преподавателей, 40 из которых — профессора и доктора технических наук и около 100 — доценты, кандидаты технических наук. Здесь трудятся академики РАН К.С. Демирчян, Я.Б. Данилевич, Н.Н. Тиходеев.

Для столетней истории факультета характерны

высочайшая научная квалификация его ведущих преподавателей, участие в работах, имеющих важнейшее значение для электрификации и электротехники страны, неразрывные связи с промышленностью, кооперация со специалистами других факультетов вуза.

У истоков зарождения и развития электротехнических научных школ в Политехническом институте стояли выдающиеся ученые: чл.-корр. АН СССР М.А. Шателен, академики В.Ф. Миткевич, А.Ф. Иоффе, А.А. Чернышев, М.П. Костенко, профессора А.А. Горев, А.М. Залесский, Е.Г. Шрамков, В.К. Попов, М.М. Михайлов, М.Д. Каменский, Д.В. Ефремов, А.Б. Лебедев, Б.И. Доманский и др. [2].

Хотелось бы остановиться на некоторых работах ученых факультета, имеющих первостепенное значение.

Еще в 1907 г. на территории института была сооружена первая в мире опытная воздушная линия электропередачи с расщепленными проводами. Руководил работами молодой ученый В.Ф. Миткевич. Его исследования позволили сделать основополагающий вывод о целесообразности расщепления проводов высоковольтной линии для ограничения интенсивности коронного разряда. Этот фундаментальный вывод, положенный в основу работ по созданию ЛЭП сверхвысокого напряжения, был реализован лишь спустя полвека, когда в 1956 г., намного раньше чем в других странах, в СССР была построена первая промышленная ЛЭП с расщепленными проводами.

26 марта 1913 г. под руководством М.А. Шателена была осуществлена параллельная работа первой государственной ГЭС России «Белый Уголь» (вблизи Ессентуков) и дизельной элек-

тростанции «Тепловая» в Пятигорске через высоковольтную линию напряжением 8 кВ длиной 20 км, что является первым в мире опытом создания электроэнергетической системы в современном понимании [3, 4].

Важным этапом в жизни института стало участие многих ученых в составлении плана Государственной электрификации России (ГОЭЛРО) под руководством профессоров М.А. Шателена, М.Д. Каменского, В.А. Толвинского, А.А. Горева (в то время члена президиума Госплана СССР).

В 1937 г. на базе Ленинградского политехнического института под руководством А.А. Горева создается бюро Куйбышевских работ для исследования проблем, связанных с сооружением Куйбышевской ГЭС и ЛЭП 400 кВ Куйбышев—Москва. Бюро являлось исследовательским центром Наркомата электростанций в области дальних электропередач. Был построен новый корпус с уникальным залом для высоковольтных испытаний. Подобные залы за рубежом появились много позже. Рядом с высоковольтным корпусом был сооружен опытный пролет трехфазной ЛЭП 400 кВ с расщепленными проводами, в проектировании и сооружении которого участвовали профессор А.А. Горев, В.Ф. Миткевич, А.А. Чернышев.

Вышеупомянутым работам предшествовал выход в свет написанных учеными факультета монографий и книг, которые определили развитие электротехники в нашей стране на многие десятилетия вперед. Среди них знаменитая «СЭТ» — шеститомная «Справочная книга для электротехников», изданная в 1928—1934 гг. по случаю 25-летия электромеханического факультета, книги В.Ф. Миткевича и П.Л. Калантарова, ставшие

основой многократно переиздававшегося классического учебника «Теоретические основы электротехники», совершенствованию и переработке которого многие годы посвятили академики Л.Р. Нейман и К.С. Демирчян. В 1936 г. вышли монография А.А. Горева «Введение в теорию устойчивости параллельной работы электрических станций» и его основополагающая работа «Основные уравнения неустановившегося режима синхронной машины», составившая основу фундаментальной монографии А.А. Горева «Переходные процессы синхронной машины», изданной в 1950 г. Н.Н. Щедрин в 1935 г. опубликовал монографию «Токи короткого замыкания высоковольтных систем», в которой в матричной форме были впервые изложены строгие методы расчета



Политехники, организаторы и участники разработки плана ГОЭЛРО: акад. А.В. Винтер, проф. В.А. Толвинский, чл.-корр. АН СССР М.А. Шателен, акад. В.Ф. Миткевич (фотография 20-х годов)

токов короткого замыкания в сложных электрических сетях. Книги А.А. Горева и Н.Н. Щедрина не утратили своего значения и сегодня. В 1937 г. под редакцией профессора Е.Г. Шрамкова был выпущен фундаментальный учебник «Электрические и магнитные измерения». Перечнем этих выдающихся работ не исчерпывается вклад ученых электромеханического факультета в развитие отечественной электротехнической науки.

Теоретическому и экспериментальному исследованию процессов, происходящих в электроэнергетических системах (ЭЭС), способствовало развитие идеи физического моделирования электропередач и ЭЭС. Эти работы еще в 30-е годы были начаты не электромеханическом факультете. Здесь следует назвать профессоров В.А. Толвинского, М.П. Костенко и О.В. Щербачева. Одна из первых в мире электродинамических моделей была построена в высоковольтном корпусе института, более совершенная модель — в Институте электромеханики АН СССР, возглавлявшемся М.П. Костенко. Научные основы проектирования электрогенераторов для электродинамических моделей были разработаны под его руководством. Для обеспечения в соответствии с критериями подобия требуемых параметров модельных генераторов была предложена оригинальная система компенсации активных сопротивлений в цепи возбуждения с использованием специальных коллекторных машин переменного тока. За разработку и создание комплекса электродинамических моделей академику М.П. Костенко была присуждена Ленинская премия.

Создание экспериментальной базы позволило нашим ученым в течение длительного времени удерживать передовые позиции в исследованиях свойств крупных энергообъединений.

Выполненные в конце 40-х — начале 50-х годов исследования электропередач, настроенных на половину волны, доказали принципиальную возможность передачи электрической энергии по ЛЭП переменного тока длиной 2000—4000 км, что явилось выдающимся вкладом наших ученых (А.А. Вульфа, Н.Н. Щедрина и О.В. Щербачева) в развитие техники электропередачи во всем мире.

Появление вычислительной техники в 50-е годы обусловило зарождение нового направления в исследованиях больших электроэнергетических систем, в том числе статической устойчивости дальних электропередач. Существенный вклад в развитие этого направления внесли профессора И.А. Груздев, М.Л. Левинштейн, Ю.В. Ракитский, В.С. Тарасов.

Уникальный по тому времени парк аналоговых вычислительных машин был создан в ЛПИ в лаборатории ЭС и ТВН им. А.А. Горева во второй половине 50-х годов. С его помощью были выполне-

ны исследования динамических свойств крупных энергообъединений, устойчивости энергосистем Европейской части СССР и Сибири. Были проведены обширные исследования, которые подтвердили правильность схемно-режимных решений, положенных в основу ЕЭС СССР, и позволили дать рекомендации по автоматическому управлению энергосистемами в аварийных условиях. В этих работах принимали участие О.В. Щербачев, М.Л. Левинштейн, И.А. Груздев, Ю.Н. Руденко, Л.А. Кучумов, А.А. Рагозин, С.В. Смоловик и др.

В это же время началась интенсивная разработка математического обеспечения для решения задач электроэнергетики на ЭВМ. Наибольшей известностью пользовались программы расчета коммутационных перенапряжений (К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, Г.А. Евдокунин), исследований колебательной статической и динамической устойчивости (О.В. Щербачев, Ю.П. Горюнов), расчета установившихся режимов и апериодической статической устойчивости (О.В. Щербачев, Л.Э. Ножин, А.М. Конторович, Ю.В. Макаров).

На основе математического моделирования выполнен большой комплекс научно-исследовательских работ по обоснованию схемно-режимных решений в развивающейся ЕЭС, связанных с повышением эффективности устройств автоматического регулирования возбуждения, с ограничением перенапряжений и токов короткого замыкания. Крупные комплексные исследования проводились для Красноярской ГЭС и ОЭС Сибири (1960—1970 гг.), Саяно-Шушенской ГЭС (1970—1980 гг.) и других электростанций и систем Сибири, Дальнего Востока и Европейской части России. Ученые факультета принимали участие в экспериментальных работах по уточнению законов регулирования генераторов электростанций Сибири, в обосновании режимов транзитной электропередачи Экибастуз—Урал—Центр напряжением 1150 кВ.

В 50-х годах был создан принципиально новый синтетический метод испытаний высоковольтных выключателей на отключающую способность, позволяющий строить мощные и значительно более дешевые испытательные установки. Была разработана и в кратчайшие сроки реализована испытательная установка — колебательный контур А.А. Горева. Активными участниками этих работ были профессора О.В. Щербачев, Г.А. Кукеков и Г.С. Кучинский, старшие научные сотрудники В.В. Каплан и В.М. Нашатырь. За создание синтетического метода испытаний выключателей и колебательного контура группа ученых была удостоена Государственной премии СССР. В настоящее время данный метод широко используется во всем мире. В этот же период ученые факультета активно участвуют в

разработке и испытаниях воздушных выключателей и трансформаторов тока (завод «Электроаппарат») и магнитовентильных разрядников (завод «Пролетарий») для первой электропередачи 400 (500) кВ.

Более четырех десятилетий под руководством чл.-кор. РАН М.В. Костенко велись работы, посвященные исследованию электромагнитных процессов в энергосистемах, грозовых и коммутационных перенапряжений, экологических проблем воздействия линий электропередачи на окружающую среду и влияния на линии связи. В результате были разработаны методы анализа надежности грозозащиты подстанций и линий, созданы анализаторы грозозащиты и автоматические регистраторы перенапряжений в сетях энергосистем. С помощью последних был получен огромный статистический материал, позволивший разработать схемные мероприятия и создать аппараты, предназначенные для глубокого ограничения перенапряжений в энергосистемах. В этих работах принимали участие профессора О.В. Щербачев, М.Л. Левинштейн, К.П. Кадомская, Ф.Х. Халилов и др.

Профессор Г.С. Кучинский широко известен своими исследованиями характеристик частичных разрядов в изоляции оборудования высокого напряжения и работами в области высоковольтных импульсных конденсаторов. Разработанные под его руководством методы расчета силовых и импульсных конденсаторов, изоляции силовых трансформаторов, импульсных кабелей, внутренней изоляции аппаратов высокого напряжения позволили более обоснованно подходить к выбору рабочих и испытательных напряжений, сократить габаритные размеры, уменьшить массу и стоимость, повысить надежность электроэнергетического и электрофизического оборудования.

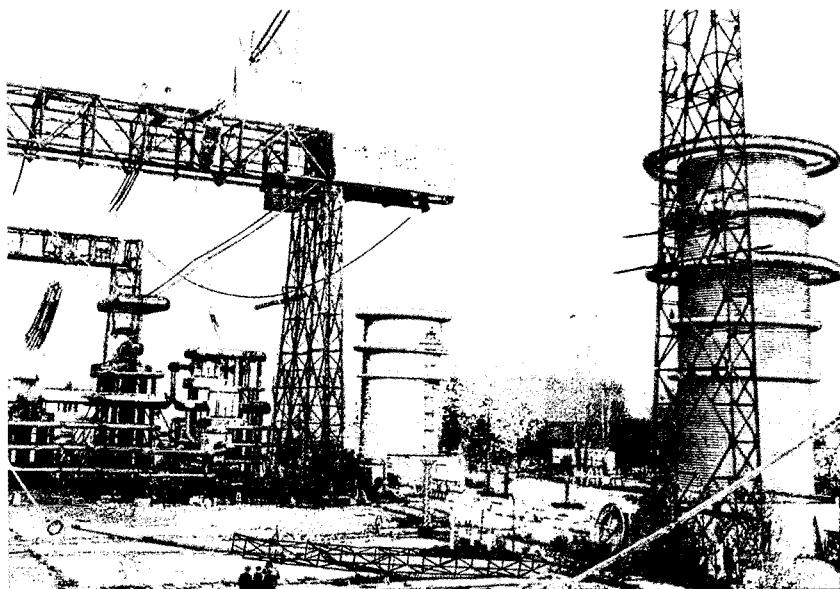
Широкой известностью в России и за рубежом пользуются работы в области электрофизики и высоковольтной импульсной техники, связанные с удержанием плазмы в термоядерных реакторах. Они проводятся под руководством профессора Г.А. Шнейерсона.

В 50–60-е годы молодой ученый Г.Н. Александров выполнил фундаментальные исследования коронного разряда на линиях электропередачи. Вопреки общепринятым представлениям он доказал, что коронный разряд на ЛЭП снижает коммутационные перенапряжения. Затем под его руководством был реализован проект уникальной лаборатории сверхвысоких напряже-

ний, обеспечивший исследования и испытания изоляционных конструкций воздушных линий и подстанций в натурных условиях без искажающего влияния посторонних заземляемых предметов. Эта лаборатория под открытым небом и сейчас сохраняет лидерство в мировой высоковольтной технике, имея в своем составе генератор импульсных напряжений на 7 млн В, два каскада испытательных трансформаторов на 2,25 млн В, опытные пролеты воздушных линий 500, 750, 1150 и 2000 кВ. Оригинальное оборудование позволило выполнить исследования, необходимые для проектирования электропередач высших классов напряжения.

К фундаментальным результатам этих испытаний следует отнести доказательство отсутствия предела электрической прочности воздушных промежутков при увеличении их длины. На их основе Г.Н. Александров (ставший сейчас членом-корреспондентом РАН) выступил совместно с другими специалистами с предложением: осуществить передачу электроэнергии напряжением 1200 кВ от электростанций Казахстана и Сибири на Урал и в Европейскую часть страны. Первая и до сих пор единственная в мире ЛЭП 1150 кВ длиной более 2500 км по временной схеме работает и сегодня. Создание такой электропередачи является выдающимся достижением и подтверждает справедливость результатов теоретических и экспериментальных исследований ученых СПбГТУ, начиная с работ академика В.Ф. Миткевича.

В 80–90-х годах работы научной школы Г.Н. Александрова были направлены на совершенствование воздушных линий электропередачи. В результате можно считать доказанными техническую возможность и экономическую целе-



Лаборатория сверхвысоких напряжений  
на электромеханическом факультете СПбГТУ

сообразность дальнейшего повышения напряжения ЛЭП вплоть до 2000 кВ, с пропускной способностью до 20000 МВт на одну цепь линии, а также существенное увеличение пропускной способности воздушных ЛЭП без повышения напряжения за счет чисто конструктивных изменений, в частности, за счет увеличения числа проводов в фазе. Реально это воплощено на ЛЭП 330 кВ Псковская ГРЭС — Новосокольники длиной 150 км.

Исследования показали, что устойчивая передача электроэнергии на дальние расстояния может быть обеспечена по ЛЭП переменного тока при использовании управляемых шунтирующих реакторов, подключенных в промежуточных пунктах линии либо по ее концам (в диапазоне длин линий от 1500 до 3000 км и от 4500 до 6000 км, в последнем случае необходимы регулируемые источники реактивной мощности). Эти результаты создают надежную основу для дальнейшего развития ЕЭС России, ее связи с ближним и дальним зарубежьем, в том числе с Западной Европой, Китаем, Южной Кореей и Японией.

Важную роль в изучении свойств электроэнергетических систем с линиями переменного и постоянного тока сыграли теоретические работы в области электромагнитных процессов в сложных нелинейных цепях с вентилями и в области преобразовательной техники, выполненные академиком Л.Р.Нейманом и учеными его школы. Эти исследования позволили обеспечить надежность работы и повысить мощность ЛЭП постоянного тока и преобразовательных подстанций.

Важные новые результаты теоретического и экспериментального исследований электромагнитных полей и электрических цепей, органически связанные с методами их численной реализации, получены академиком К.С.Демирчяном, профессорами В.Н.Борониным, И.Ф.Кузнецовым, В.М.Юриновым и др.

Цикл работ по автоматическому управлению частотой и активной мощностью Единой энергосистемы был выполнен выпускниками электромеханического факультета, профессорами Е.И. Юревичем и В.Н.Козловым, работающими на факультете технической кибернетики, и их коллегами. Полученные ими результаты использованы при экспериментальной проверке принципов управления в объединенных энергосистемах Северо-Запада и Средней Волги.

Большое внимание ученые факультета уделяют устройствам релейной защиты. В последние десятилетия в мировой практике реализуется тенденция перехода от электромеханических реле к реле на основе микроэлектроники интегрального исполнения, в том числе на основе микропроцессоров, новая элементная база обеспе-

чивает возможность применения более совершенных алгоритмов действия защиты, улучшения ее характеристик, селективности и быстродействия. Работы в этом направлении ведутся под руководством профессоров Г.М.Павлова и В.К. Ванина. Ими и их коллегами разработана комплексная защита генераторов единой серии 60 МВт и более. Комплекс включает все виды защиты от возможных аномальных режимов и коротких замыканий. Защита от однофазного замыкания на корпус статора, резервная защита от перегрузок, защита от потери возбуждения уже прошли промышленную проверку на действующих станциях, а весь комплекс испытан на электродинамической модели. Испытания показали хорошие характеристики, высокие избирательность и быстродействие защиты.

К 80-м годам важную роль в ЕЭС СССР начинают играть атомные электростанции с блоками единичной мощности до 1000 МВт и большим числом часов использования номинальной мощности (до 7500 ч). К их созданию причастны ученые физико-механического, энергомашиностроительного, гидротехнического и электромеханического факультетов нашего вуза. Обеспечение надежной и безопасной работы АЭС существенно зависит от электрической части и ее связи с энергосистемой. В обосновании надежности главных схем электрических соединений АЭС, систем электроснабжения механизмов основного технологического цикла и устройств обеспечения безопасности и локализации аварий важную роль сыграли работы профессоров Ю.Б.Гука и А.К. Черновца. Ими опубликованы первые монографии и учебные пособия по особенностям электрической части АЭС, разработаны методы расчета надежности и переходных электромеханических процессов, позволяющие сократить объем и количество потенциально опасных испытаний на действующем электрооборудовании и принимать оптимальные решения по обеспечению бесперебойного электроснабжения ответственных механизмов и устройств.

Говоря о вкладе ученых СПбГТУ в создание и развитие ЕЭС, нельзя не упомянуть о блестящей плеяде ученых, работающих в Научно-исследовательском институте постоянного тока (НИИПТ). Академик РАН Н.Н.Тиходеев, профессора А.В.Поссе, Л.А.Кошечев, Е.А.Марченко, В.И.Галанов, В.А.Андреюк и многие другие в течение нескольких десятилетий плодотворно сотрудничают с электромеханическим факультетом, выпускниками которого являются.

Кафедра «Электрические машины» была организована в 1902 г. по инициативе М.А.Шателена и является одной из старейших в России и мире. Важная роль в становлении научно-педагогической школы кафедры принадлежит ее заведую-

щим — профессорам С.Н. Усатому (основатель и первый руководитель кафедры), В.А. Толвинскому, М.П. Костенко, А.И. Вольдеку, В.В. Романову и В.В. Попову. Среди блестящих педагогов и ученых кафедры нельзя не назвать профессоров Г.А. Люста, А.Б. Лебедева, А.В. Вульфа, Н.Н. Черносвитова, Л.М. Пиотровского, Д.А. Завалишина, Д.В. Ефремова, И.М. Постникова, А.И. Важнова, П.Ю. Каасика, В.Е. Скобелева. На протяжении многих десятилетий продолжается тесное сотрудничество кафедры с флагманом отечественного электроэнергетического машиностроения — предприятием «Электросила».

Академик, лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, Герой Социалистического Труда М.П. Костенко — наиболее выдающаяся личность в отечественном электромашиностроении. С конца 30-х годов и до последних дней его жизни ни одна серьезная задача, поставленная перед советским электромашиностроением, не решалась без участия Михаила Полиевктовича.

В 60—80-е годы производство турбо- и гидрогенераторов характеризовалось увеличением их единичных мощностей. В связи с этим на стадии проектирования все более остро ощущалась потребность в получении информации о распределении по объему элементов электрогенераторов различных физических полей, локальная интенсивность которых определяет условия безотказной работы машины. Необходимо было создать и апробировать научно-методические основы моделирования взаимосвязанных электромагнитных, тепловых, термомеханических, механических и других процессов и полей. Встала задача создания математических моделей высокого уровня адекватности и эффективного математического обеспечения их реализации. К работам по созданию такой методологии в начале 60-х годов приступили коллективы под руководством академика РАН К.С. Демирчяна, профессоров А.И. Вольдека и А.И. Важнова. В настоящее время их возглавляет заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор В.В. Попов.

На основе разработанной методологии были выявлены закономерности и особенности общего и локального распределения различных физических полей и процессов в наиболее напряженных узлах турбо- и гидрогенераторов и создана система конструкторско-технологических мероприятий по повышению экономичности и надежности отечественных электрических машин, стабилизации их теплового состояния, улучшению и вибрационной стойкости их элементов и узлов в различных режимах. Внедрение этих мероприятий в практику способствовало существенному повышению технического уровня и конкурентоспособности продукции отечественного электромашиностроения.

В начале 60-х годов на электромеханическом факультете возникла научная школа плазменной техники и технологии, у истоков которой стояли профессора А.В. Донской и С.В. Дресвин. Сегодня она приобрела широкую известность не только в России, но и далеко за ее пределами.

В одной статье невозможно перечислить все научные направления, темы исследований, фамилии руководителей и исполнителей работ, которые проводились и проводятся на электромеханическом факультете Санкт-Петербургского государственного технического университета, упомянуть всех выдающихся выпускников, оставивших заметный след в отечественной науке и промышленности.

Хочется добавить к сказанному, что коллектив факультета в решении задач подготовки специалистов и проведении научных исследований постоянно кооперировался с учеными других факультетов вуза, промышленными предприятиями страны, научно-исследовательскими и проектными организациями, учреждениями Академии наук. В качестве примеров такого сотрудничества можно назвать комплексный договор ЛПИ с «Электросилой», выполнявшийся в 70-х годах, договор двадцати восьми организаций, участвовавших в творческом научно-техническом содружестве при создании Саяно-Шушенской ГЭС.

И сегодня в такое трудное для России время, когда потенциал науки и высшей школы оказался невостребованным, коллектив электромеханического факультета нашего вуза остается верным сложившимся на протяжении прошедшего столетия традициям, своими делами доказывая, что является одной из крупнейших электротехнических школ нашей страны и мира. В настоящее время на факультете учатся 842 студента и 37 аспирантов. Ученые факультета ведут научные исследования, широко используя международные связи, которые особенно прочны с вузами ФРГ, Франции, США, Канады, КНР, Индии и, конечно, стран СНГ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Политехники:** выдающиеся ученые, основатели научных школ и направлений. Электромеханический факультет / Под ред. проф. В.С. Тарасова. — Л.: Ленингр. гос. техн. ун-т, 1990.
2. **Профессора** Санкт-Петербургского государственного технического университета. Биографический справочник. — СПб: Изд. СПбГТУ, 1996.
3. **Александров Ю.А.** Первая в мире энергосистема. — Научно-технические ведомости СПбГТУ, 1996, № 4.
4. **Первая в мире энергосистема.** — Научно-технические ведомости СПбГТУ, 1997, № 4.

[24.09.98]

*Автор: Васильев Юрий Сергеевич в 1951 г. окончил гидротехнический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ, ныне Санкт-Петербургский государственный технический университет, СПбГТУ). В 1973 г. защитил докторскую диссертацию. Президент СПбГТУ, чл.-кор. РАН, заведующий кафедрой «Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика».*

# Совершенствование защиты блока генератор—трансформатор от замыканий на землю

БУЛЫЧЕВ А.В., ВАНИН В.К.

Рассмотрены пути повышения эффективности защит блока генератор—трансформатор от однофазных замыканий на землю. Предложены методы, позволяющие не только контролировать сопротивление изоляции сети с изолированной нейтралью при работающем оборудовании, но и определять характер процесса ее ухудшения и место возникновения повреждения. Методы основаны на анализе сигналов, формируемых с помощью высоковольтного электронного коммутатора. Предложены схемы устройств, реализующих методы, и рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: сети, блоки генератор—трансформатор, защита от замыканий на землю

Действия средств защиты от однофазных замыканий на землю в цепях статора с изолированной нейтралью, на которые возлагаются ответственные функции предупреждения аварий, могут стать более эффективными, если применить специальные наиболее продуктивные алгоритмы работы.

Хорошие перспективы открывают коммутационные методы, своеобразие которых проявляется в способности контролировать состояние изоляции в нормальных условиях и определять характер и место возникновения повреждения в аварийных ситуациях.

Эти методы основаны на анализе сигналов, формируемых с помощью коммутатора в специально созданных цепях, соединяющих защищаемую сеть генераторного напряжения с землей.

На рис. 1 показана схема замещения контролируемой сети генераторного напряжения с коммутатором, выполненным на основе трех диодных ключей  $V1, V2, V3$ .

С помощью коммутатора выбирается фаза с наибольшим напряжением относительно земли и соединяется с землей через ограничительное

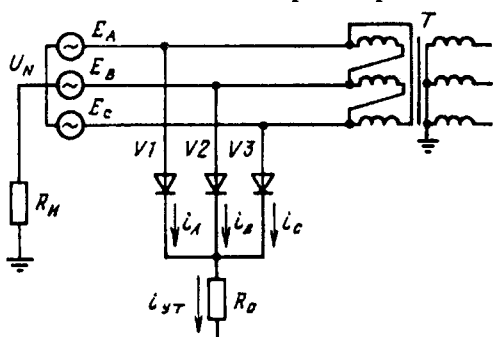


Рис. 1

Ways for increasing the effectiveness of the «generator—transformer» unit single-phase earth-fault protections are considered. Methods are proposed which make it possible not only to check the insulation of a network with insulated neutral when equipment is on operation but also to determine the character of the insulation deterioration processes and to detect damage location. The methods are based on an analysis of signals formed with the help of a high-voltage switchgear. Schemes of devices which realize the methods proposed and recommendations on their use are given.

Key words: networks, «generator—transformer» unit, earth-fault protection

сопротивление  $R_0$ . В результате по сопротивлению  $R_0$  протекает ток утечки, интегральное значение и форма которого зависят от сопротивления изоляции и места повреждения. Используя этот ток в качестве полезного сигнала, можно оценивать состояние изоляции в нормальных условиях и определять место повреждения в аварийных ситуациях с достаточной для целей релейной защиты достоверностью.

В защищаемой цепи действуют ЭДС:

$$E_A = E_m \sin \omega t; \quad E_B = E_m \sin (\omega t - 2\pi/3);$$

$$E_C = E_m \sin (\omega t - 4\pi/3).$$

Здесь  $E_m$  и  $\omega$  — амплитуды фазных ЭДС сети и их угловая частота.

В симметричном режиме работы при исправной изоляции всех фаз диодные ключи поочередно открываются и по сопротивлению  $R_0$  протекает ток утечки под действием фазных ЭДС (рис. 2, а). Среднее значение этого тока за период ЭДС

$$I'_{\text{УТ}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_3} = \frac{3}{2\pi R_3} \int_{-\pi/3}^{+\pi/3} E_m \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_3} E_m,$$

где  $U_{\text{ср}}$  — среднее значение падения напряжения на эквивалентном сопротивлении цепей утечки на землю;  $R_3$  — эквивалентное активное сопротивление электрических цепей утечки на землю;  $R_3 = R_{\text{и}} + R_0$ ;  $R_{\text{и}}$  — эквивалентное сопротивление изоляции защищаемой цепи относительно земли;  $R_0$  — сопротивление ограничительного резистора в устройстве.

Аналогично определяются средние значения

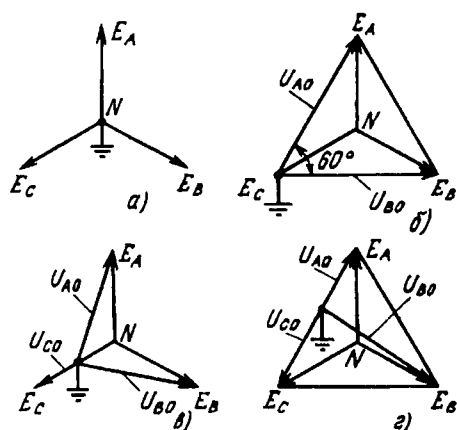


Рис. 2

тока утечки при симметричном снижении сопротивления изоляции и замыкании на землю в нейтрали обмотки статора. При однофазном замыкании на землю в защищаемой сети напряжение на этой фазе относительно земли равно нулю. Диодный ключ этой фазы шунтируется электрическим проводником, возникающим в месте повреждения, и по резистору  $R_0$  протекают токи утечки только двух неповрежденных фаз под действием двух линейных ЭДС. Например, при замыкании фазы  $C$  ток утечки обусловлен действием ЭДС  $E_{AC}$  и  $E_{BC}$  (рис. 2,б). Среднее значение тока утечки в этих условиях

$$I_{yt}'' = \frac{U_{cp}}{R_3} = \frac{1}{\pi R_3} \int_0^{2\pi} E_{лм} \sin \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_3} E_m,$$

где  $E_{лм}$  — амплитуда линейной ЭДС.

Как видно, среднее за период значение тока утечки на землю не зависит от места повреждения

$$I_{yt}' = I_{yt}'' = I_{yt}$$

и в реальных условиях работы сети определяется практически эквивалентным сопротивлением цепей утечки. Его можно использовать для определения сопротивления изоляции контролируемой цепи относительно земли:

$$R_{и} = R_3 - R_0 = \frac{3\sqrt{3} E_m}{2\pi I_{yt}} - R_0.$$

В случае повреждения изоляции в обмотке (например, в обмотке фазы  $C$ ) напряжения фаз контролируемой сети относительно земли можно представить в тригонометрической форме следующим образом (рис. 2,в):

$$U_{A0} = E_m \sin \omega t - (1 - \alpha) E_m \sin (\omega t - 4\pi/3);$$

$$U_{B0} = E_m \sin (\omega t - 2\pi/3) - (1 - \alpha) E_m \sin (\omega t - 4\pi/3);$$

$$U_{C0} = \alpha E_m \sin (\omega t - 4\pi/3).$$

Здесь  $U_{A0}$ ,  $U_{B0}$ ,  $U_{C0}$  — напряжения фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  сети относительно земли при повреждении в обмотке;  $\alpha$  — расстояние (кратное числу витков обмотки) от фазного вывода поврежденной обмотки до места повреждения в этой обмотке, измеряемое в отн. ед.

При замыкании на землю в катушке  $CA$  обмотки трансформатора, соединенной треугольником, напряжения сети относительно земли можно представить так (рис. 2,г):

$$U_{C0.T} = \alpha [E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) - E_m \sin \omega t];$$

$$U_{A0.T} = (1 - \alpha) [E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) - E_m \sin \omega t];$$

$$U_{B0.T} = \alpha [E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) - E_m \sin \omega t] + [E_m \sin (\omega t - 2\pi/3) - E_m \sin (\omega t - 4\pi/3)].$$

На рис. 3,а показаны токи утечки при повреждениях в разных точках обмотки фазы  $C$  генератора, а на рис. 3,б — при повреждении в катушке  $CA$  обмотки трансформатора, соединенной треугольником. Как видно, форма тока утечки изменяется при изменении места повреждения.

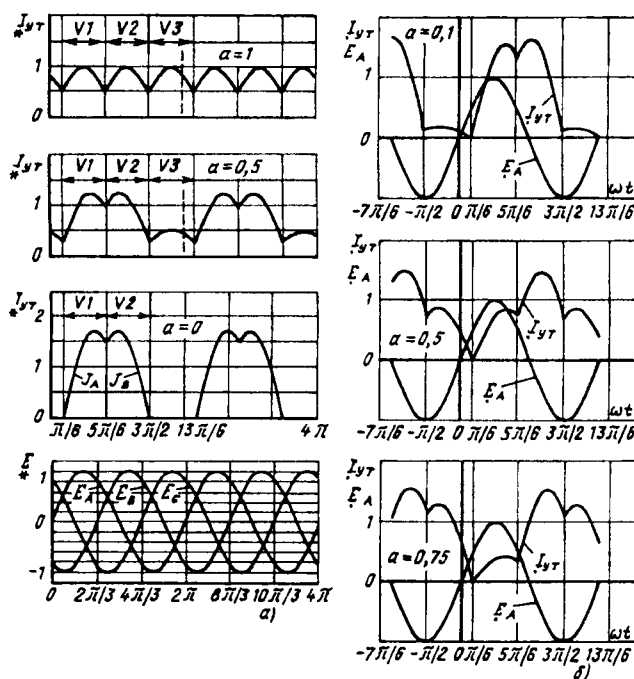


Рис. 3

Принимая во внимание то, что моменты переключения диодных ключей соответствуют углам  $\omega t$ , равным  $\pi/6$ ,  $5\pi/6$ ,  $3\pi/2$ ,  $13\pi/6$  и т.д., средние значения токов утечки отдельных фаз (токов, протекающих по отдельным диодным ключам) при повреждении в обмотке статора генератора (соединенной звездой) равны:

$$I_A = \frac{3}{2\pi R_3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U_{A0} d\omega t = \frac{3E_m}{2\pi R_3} \left[ \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \alpha) \right];$$

$$I_B = \frac{3}{2\pi R_3} \int_{5\pi/6}^{3\pi/2} U_{B0} d\omega t = \frac{3E_m}{2\pi R_3} \left[ \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \alpha) \right];$$

$$I_C = \frac{3}{2\pi R_3} \int_{3\pi/2}^{13\pi/6} U_{C0} d\omega t = \alpha \sqrt{3} \frac{3E_m}{2\pi R_3}.$$

Здесь средние значения токов утечки двух исправных фаз равны, а среднее значение тока утечки поврежденной фазы меньше их. Только при  $\alpha=1$  (замыкание в нейтрали) средние значения токов утечки всех фаз равны.

Отношение среднего значения тока утечки поврежденной фазы (наименьшего из средних значений токов утечки фаз) к среднему значению тока утечки за период равно расстоянию (числу витков) от фазного вывода поврежденной обмотки до места повреждения в обмотке (в отн. ед.):

$$I_C/I_{yT} = I_C/[(I_A + I_B + I_C)/3] = \alpha.$$

При повреждении в обмотке трансформатора (соединенной треугольником) средние значения токов утечки отдельных фаз определяются аналогично (см. рис. 3,б):

$$I_{AT} = \frac{9\sqrt{3} E_m}{4\pi} (1 - \alpha); \quad I_{BT} = \frac{9\sqrt{3} E_m}{4\pi};$$

$$I_{CT} = \frac{9\sqrt{3} E_m}{4\pi} \alpha.$$

Эти значения не равны, но необходимо отметить, что в одном частном случае при  $\alpha=0,5$  ток  $I_{AT}$  равен  $I_{CT}$ .

Одно из средних значений тока утечки (ток утечки исправной фазы) больше двух других (токов утечки фаз, связанных с поврежденной катушкой). При этом отношение наименьшего из трех среднего значения тока утечки фазы к среднему значению тока утечки за период пропорционально расстоянию от ближайшего фазного вывода до места повреждения, например:

$$I_{CT}/I_{yT} = 3\alpha/2.$$

Здесь, как видно, в отношении содержится постоянный множитель 3/2.

На рис. 4 представлена схема устройства, в котором используются отмеченные информативные свойства тока утечки. Для удобства анализа работы устройства на схеме дополнительно показаны первичные физические величины, которые представляются в реальном устройстве в определенном масштабе в виде вторичных сигналов.

Коммутатор выполнен на основе трех диодных столбов, аноды которых подключены к фазам сети, а катоды соединены между собой. После-

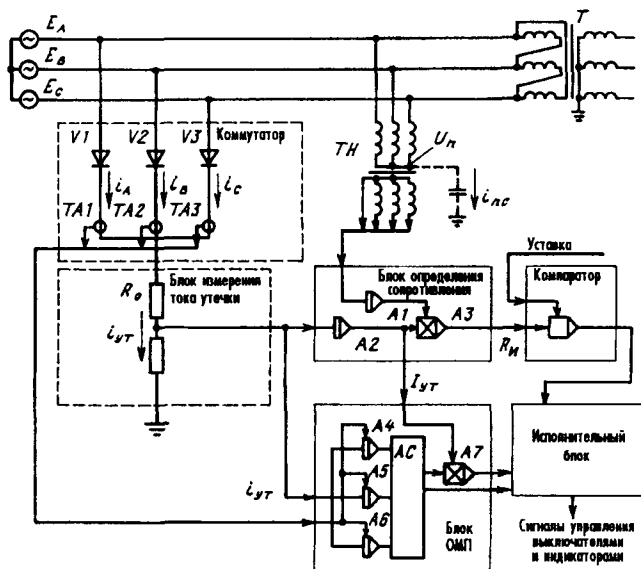


Рис. 4

довательная цепь, содержащая ограничительный резистор  $R_0$  и сопротивление шунта  $R_{ш}$ , соединяет катоды диодов с землей и обеспечивает ограничение максимального значения тока утечки на землю через коммутатор. Падение напряжения на сопротивление  $R_{ш}$  пропорционально току утечки и используется как полезный сигнал.

Операция усреднения тока утечки выполняется в блоке определения сопротивления с помощью интегратора  $A1$ , а среднее значение ЭДС сети определяется с помощью интегратора  $A2$ . В этом же блоке вычисляется отношение интегрального (среднего) значения ЭДС сети к среднему значению тока утечки. Для этого используется делитель сигналов  $A3$ . Датчиком фазных ЭДС в устройстве служит трансформатор напряжения (ТН) с обмотками, соединенными по схеме «звезда—звезда с нулем». Из полученного отношения и с учетом известного ограничительного сопротивления находится эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли.

Эквивалентное сопротивление изоляции сравнивается компаратором с уставкой. Если оно оказывается меньше допустимого значения, то на выходе компаратора формируется дискретный сигнал, который передается в исполнительный блок, а аналоговый сигнал, пропорциональный току утечки, поступает на вход блока определения места повреждения.

В блоке определения места повреждения производится анализ формы тока утечки и по результатам этого анализа устанавливается место возникновения повреждения. В частности, определяются средние значения токов утечки каждой фазы. Для этого сигнал, пропорциональный току утечки фазы, выбранной коммутатором, подается на вход интегратора, соответствующего

выбранной фазе (A4—A6). По сигналу датчика состояния диодного ключа этот сигнал интегрируется от момента замыкания диодного ключа соответствующей фазы до момента его размыкания. Таким образом, на выходе интегратора формируется сигнал, пропорциональный среднему значению тока утечки одной фазы. Это значение хранится интегратором в течение установленного интервала времени. Средние значения токов утечки других фаз определяются аналогично с помощью других интеграторов и датчиков состояния диодных ключей. Информация о том, какой из диодных ключей открыт в данный момент и ток утечки какой из фаз протекает по ограничительному сопротивлению, передается в блок определения места повреждения непосредственно из коммутатора от датчиков TA1, TA2, TA3. Возможно получение этой информации и косвенным путем по известным значениям моментов переключения диодных ключей и ЭДС сети.

В конце каждого интервала времени, соответствующего периоду ЭДС сети, средние значения токов утечки фаз из интеграторов сравниваются между собой амплитудным селектором (AC). Выбираются наибольшие и наименьшие из них. Если два из них равны между собой и больше третьего, то считается, что повреждение произошло в обмотке генератора (соединение звездой). Если одно из значений больше двух других, то считается, что повреждение — в обмотке трансформатора (соединение треугольником). Определяется фаза, в которой средний ток утечки имеет наименьшее значение, и делается заключение о том, что повреждена эта фаза. Формируется информирующий сигнал. Если средние значения токов утечки всех фаз равны, то делается заключение, что повреждение произошло в нейтрали обмотки, и формируется соответствующий сигнал.

С помощью делителя A7 вычисляется отношение наименьшего из средних значений токов утечки фаз к среднему значению тока утечки за период ЭДС сети. Численное значение полученного отношения (с учетом постоянного множителя при повреждении в обмотке трансформатора) передается в исполнительный блок и выводится на индикатор как сигнал, информирующий об удаленности места повреждения от фазного вывода обмотки.

Ограничительное сопротивление  $R_0$  выбирается с учетом предельных возможностей диодов, используемых в коммутаторе, и условий безопасности. Для сети 6—10 кВ оно должно иметь значение 2—8 МОм.

Применение рассмотренного способа связано с ограничениями. При его использовании на-

рушается симметрия защищаемой трехфазной сети относительно земли, так как всегда (в любой момент) какая-либо из фаз сети соединена с землей через ограничительное сопротивление. В результате этого появляется постоянное напряжение смещения между нейтралью сети и землей. Значение этого напряжения смещения зависит от эквивалентного сопротивления изоляции сети относительно земли  $R_{\text{и}}$  и ограничительного сопротивления  $R_0$ :

$$U_{\text{No}} = U_{\text{ср}} R_{\text{и}} / (R_{\text{и}} + R_0) = \frac{3\sqrt{3} E_m}{2\pi} \frac{R_{\text{и}}}{(R_{\text{и}} + R_0)}.$$

При исправной изоляции, когда  $R_0 \ll R_{\text{и}}$ , напряжение смещения может достигать значения  $U_{\text{No}} = \frac{3\sqrt{3} E_m}{2\pi} \approx 0,83 E_m$ .

Постоянное напряжение смещения нейтрали вызывает повышение напряжения фазных проводников сети относительно земли, поэтому для ряда случаев может оказаться более целесообразным использование другого способа, суть которого состоит в использовании коммутатора с шестью диодными ключами (рис. 5).

С помощью этого коммутатора одновременно выбираются фазы с наибольшим и наименьшим напряжением относительно земли и соединяются с землей через отдельные ограничительные сопротивления. Измеряется сумма токов утечки на землю в этих сопротивлениях и фазные напряжения сети. По отношению этих величин определяется сопротивление изоляции сети относительно земли, которое сравнивается с допустимым значением, и, если оно оказывается меньше допустимого, формируется сигнал на отключение защищаемой сети. Измеряются параметры, характеризующие форму сигнала, пропорционального разности токов в ограничительных сопротивлениях, и по ним определяется ме-

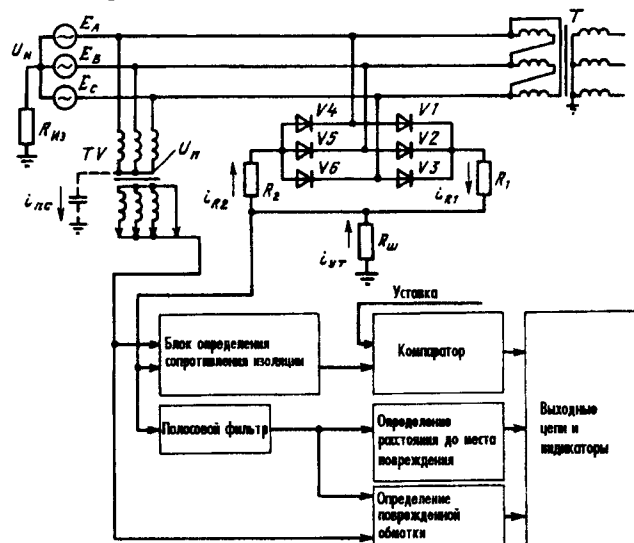


Рис. 5

сто повреждения изоляции.

Напряжение смещения нейтральной точки сети в нормальных условиях (когда сопротивление изоляции много больше ограничительного сопротивления) определяется разностью первого  $R_1$  и второго  $R_2$  ограничительных сопротивлений и эквивалентным сопротивлением изоляции сети относительно земли  $R_n$ :

$$U_N = \frac{3E_m}{\pi} \frac{R_1 - R_2}{(R_1 + R_n)(R_2 + R_n)}.$$

Приемлемое смещение нейтральной точки обеспечивается путем подбора ограничительных сопротивлений. Причем, чем меньше различаются значения ограничительных сопротивлений, тем меньше напряжение смещения нейтральной точки. В предельном случае, когда  $R_1 = R_2$ , это смещение равно нулю. Но при этом теряется важнейшее свойство метода — возможность контролировать сопротивление изоляции в симметричной относительно земли сети, поэтому сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  не должны быть равными.

Задачи измерения эквивалентного сопротивления изоляции и определения места повреждения в этом устройстве решены другим способом — на основе гармонического анализа тока утечки.

В нормальных условиях, когда эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли много больше сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , по диодным ключам и ограничительным резисторам  $R_1$  и  $R_2$  протекают, соответственно, токи  $i_{R1}$  и  $i_{R2}$ , которые определяются, практически, ЭДС сети и сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . Тогда можно принять  $i_{R1} = i_{R2} = i_R$ . Период колебаний этого тока  $i_R$  составляет  $1/6$  периода ЭДС сети, т.е.  $\pi/3$  (рис. 6).

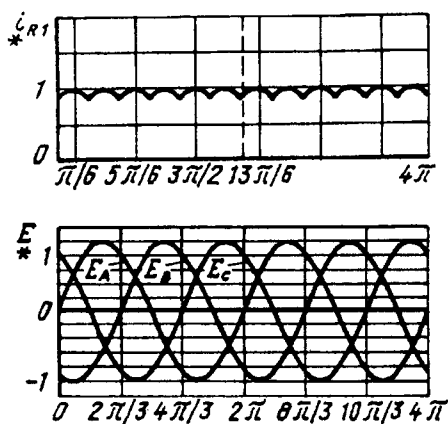


Рис. 6

Представляя ток рядом Фурье, имеем:

$$i_R(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T},$$

где  $k$  — целое число;  $I_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_R(t) dt$  — среднее

значение тока за период (постоянная составля-

ющая);  $a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_R(t) \cos 2\pi k \frac{t}{T} dt$ ;  $b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_R(t) \times$

$\sin 2\pi k \frac{t}{T} dt$  — коэффициенты ряда.

Начальная фаза колебаний в рассматриваемых условиях при исправной изоляции не имеет значения. Поэтому за начало отсчета по оси абсцисс удобно принять точку, относительно которой функция, выражающая ток, симметрична. Тогда все синусоидальные члены ряда равны нулю и ток можно представить в виде косинусного ряда:

$$i_R = \frac{3E_m}{\pi R_3} \left( 1 + \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \frac{2}{143} \cos 12\omega t + \right. \\ \left. + \frac{2}{323} \cos 18\omega t + \dots \right).$$

Здесь  $R_3 = R_1 + R_2$  — эквивалентное сопротивление цепи для тока  $i_R$  при  $R_n \rightarrow \infty$ .

Как видно, в этих условиях наибольшую амплитуду имеет гармоническая составляющая тока с частотой, превышающей частоту ЭДС сети в 6 раз.

При симметричном снижении сопротивления изоляции во всех фазах, когда эквивалентное сопротивление изоляции сети относительно земли соизмеримо с сопротивлением  $R_1$  или при наличии значительной емкости проводников сети относительно земли появляются дополнительные составляющие токов в резисторах  $R_1$  и  $R_2$ . Эти составляющие протекают в двух контурах. Первый из них образован диодными ключами  $V1$ — $V3$ , ограничительным сопротивлением  $R_1$ , шунтом  $R_{ш}$ , источниками ЭДС сети и сопротивлением изоляции сети относительно земли. Вторым контур образован диодными ключами  $V4$ — $V6$ , ограничительным сопротивлением  $R_2$ , шунтом, источниками ЭДС сети и сопротивлением изоляции сети относительно земли. Период колебаний токов в ограничительных сопротивлениях составляет  $1/3$  периода ЭДС сети (см. рис. 3,а).

Приняв допущения, используемые для предыдущего режима, ток утечки (протекающий по шунту) можно представить в этих условиях в виде разности (с учетом направлений токов в шунте) двух косинусных рядов Фурье. Постоянная составляющая тока утечки (среднее значение) в этих условиях определяется так:

$$I_{\text{ут.с}} = \frac{3\sqrt{3} E_m (R_1 - R_2)}{2\pi (R_1 + R_{\text{и}}) (R_2 + R_{\text{и}})}.$$

Изменение сопротивления изоляции сети относительно земли, как видно, вызывает изменение среднего значения тока утечки. Замыкание на землю в нейтральной точке обмотки представляет собой предельный случай симметричного режима при  $R_{\text{и}}=0$ . Следовательно, интегральное (среднее) значение тока можно использовать в качестве информационного параметра при определении сопротивления изоляции.

Для определения места повреждения необходимо выделить первую гармоническую составляющую тока утечки. При замыкании на землю в обмотке генератора он может быть представлен разными непрерывными функциями на отдельных временных интервалах в пределах периода колебаний. Например, ток в первом ограниченном сопротивлении при повреждении в обмотке фазы С можно записать следующим образом (см. рис. 2,а):

$$i_{R1} = \begin{cases} i_1(\omega t) & \text{при } 0 \leq \omega t < \pi/6; \\ i_2(\omega t) & \text{при } \pi/6 \leq \omega t < 5\pi/6; \\ i_3(\omega t) & \text{при } 5\pi/6 \leq \omega t < 3\pi/2; \\ i_4(\omega t) & \text{при } 3\pi/2 \leq \omega t < 2\pi; \end{cases}$$

Здесь

$$i_1(\omega t) = \frac{E_m \alpha}{R_3} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right);$$

$$i_2(\omega t) = \frac{E_m}{R_3} \left[ \sin(\omega t) - (1 - \alpha) \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right];$$

$$i_3(\omega t) = \frac{E_m}{R_3} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - (1 - \alpha) \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right];$$

$$i_4(\omega t) = \frac{E_m \alpha}{R_3} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Среднее за период значение тока утечки

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{ср1}} + I_{\text{ср2}} + I_{\text{ср3}} + I_{\text{ср4}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_3} E_m,$$

где

$$I_{\text{ср1}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{\pi}{6}} i_1(\omega t) d\omega t = \frac{E_m}{4R_3} \alpha \frac{\sqrt{3}-1}{\pi};$$

$$I_{\text{ср2}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} i_2(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{3}}{4R_3} E_m \frac{3-\alpha}{\pi};$$

$$I_{\text{ср3}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{5\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{2}} i_3(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{3}}{4R_3} E_m \frac{3-\alpha}{\pi};$$

$$I_{\text{ср4}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} i_4(\omega t) d\omega t = \frac{E_m}{4R_3} \alpha \frac{1+\sqrt{3}}{\pi};$$

$T=2\pi$  — период тока утечки при повреждении в обмотке.

Составляющая тока утечки первой гармоники представляет собой косинусоидальную функцию с периодом  $T$ :

$$i_{R1(1)} = I_{m1} \cos(\omega - \varphi_1),$$

амплитуда  $I_{m1}$  и начальный фазовый сдвиг  $\varphi_1$  которой определяются коэффициентами для первой гармоники:

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i_{R1}(\omega t) \cos 2\pi \frac{t}{T} d\omega t;$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i_{R1}(\omega t) \sin 2\pi \frac{t}{T} d\omega t.$$

Каждый из этих интегралов можно определить как сумму четырех определенных интегралов, пределы интегрирования в которых соответствуют границам отдельных участков, на которых ток представлен непрерывными гармоническими функциями.

В результате интегрирования получим:

$$a_1 = \frac{E_m}{2R_3} \sqrt{3} (\alpha - 1);$$

$$b_1 = \frac{-E_m}{2R_3} (\alpha - 1).$$

Тогда для амплитуды составляющей тока  $i_{R1}$  первой гармоники будем иметь:

$$I_{m1} = \sqrt{(a_1)^2 - (b_1)^2} = \frac{E_m}{R_3} (\alpha - 1).$$

Как видно, амплитуда первой гармоники тока  $i_{R1}$  зависит от удаленности места повреждения от фазных выводов обмотки. Причем, она максимальна по абсолютному значению при замыкании фазы на землю и минимальна (равна нулю) при замыкании на землю нейтрали обмотки.

Начальный фазовый сдвиг составляющей тока

первой гармоники  $\varphi_1 = \arctg(b_1/a_1)$ .

При повреждении в фазе *С* начальный фазовый сдвиг равен  $-\pi/6$ , при повреждении в фазе *А*  $\pi/2$ , при повреждении в фазе *В*  $7\pi/6$ .

Ток  $i_{R2}$  во втором ограничительном сопротивлении, ток утечки, протекающий по шунту  $i_{yT}$ , и параметры их первых гармонических составляющих определяются с использованием аналогичного подхода.

Начальный фазовый сдвиг первой гармонической составляющей тока утечки  $i_{yT}$ , протекающего по шунту, при замыкании в обмотке, соединенной в звезду, зависит только от того, в какой фазе произошло повреждение. Так, при измерении относительно фазы *А* он равен  $\pi$  ( $180^\circ$ ) при повреждении в катушке фазы *А*,  $5\pi/3$  ( $300^\circ$ ) — при повреждении в катушке фазы *В* и  $\pi/3$  ( $60^\circ$ ) — при повреждении в катушке фазы *С*.

На рис. 7,а показаны сигналы при повреждении в обмотке генератора, соединенной звездой, а на рис. 7,б — при повреждении в обмотке трансформатора, соединенной треугольником.

Параметры первой гармонической составляющей тока утечки при повреждении в обмотке трансформатора, соединенной треугольником, имеют свои особенности. Начальный фазовый сдвиг зависит не только от того, в какой фазе произошло повреждение, но и от удаленности места повреждения от фазного вывода:

Катушка	$\alpha$	Начальный фазовый сдвиг относительно $E_A$
С—А	0—1	$60^\circ$ — $180^\circ$
А—В	0—1	$180^\circ$ — $300^\circ$
В—С	0—1	$300^\circ$ — $60^\circ$

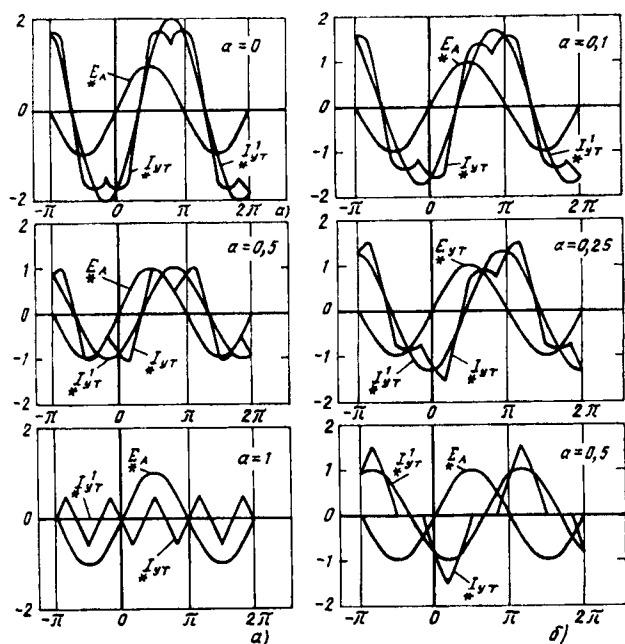


Рис. 7

Амплитуда имеет наименьшее, но не равное нулю значение при  $\alpha=0,5$ , а наибольшее — при  $\alpha=0$  и  $\alpha=1$ , что соответствует замыканию на землю первого или второго выводов катушки.

Таким образом, по амплитудам (или связанным с ними интегральным значениям) и начальным фазовым сдвигам первых гармонических составляющих тока в ограничительных сопротивлениях или в шунте можно оценить сопротивление изоляции сети относительно земли, выявить поврежденный элемент сети и определить место возникновения повреждения.

Действия по определению сопротивления изоляции и места повреждения, предусмотренные предлагаемым способом, реализуются в измерительной части устройства следующим образом.

В блоке определения сопротивления изоляции формируются интегральные значения сигналов, пропорциональные ЭДС сети и току утечки, и по ним вычисляется значение сопротивления изоляции контролируемой сети.

С помощью компаратора это значение сравнивают с уставкой. Если сопротивление изоляции становится меньше допустимого, то формируют соответствующие предупредительный, управляющий и информационный сигналы.

Первую гармоническую составляющую тока утечки выделяют с помощью полосового фильтра, который на частоте ЭДС сети имеет определенный максимальный коэффициент передачи (например, равный единице) и не изменяет фазовый сдвиг сигнала.

В блоках определения поврежденной обмотки и расстояния до места повреждения анализируются параметры первой гармонической составляющей тока утечки и по ним определяют поврежденный элемент сети и место повреждения.

Необходимо отметить, что применение рассмотренных методов требует изменения общепринятой схемы включения *ТН*. Для нормальной работы устройства следует исключить все искусственно созданные цепи утечки на землю, кроме тех, которые образованы устройством. В частности, нейтраль первичных обмоток *ТН* должна быть отсоединена от земли. Это влечет за собой вывод из работы традиционной защиты генератора от однофазных замыканий на землю по напряжению нулевой последовательности [1], необходимость в которой отпадает в связи с вводом в работу нового устройства.

Вместе с тем, изменение схемы включения *ТН* существенно улучшает условия работы этого *ТН*. Действительно, при однофазном замыкании на землю и традиционной схеме включения *ТН* две фазные первичные обмотки его оказываются подключенными на линейные напряжения, что, как правило, вызывает повышение тока намаг-

ничивания и насыщение магнитопровода. В этом случае неизбежно создаются благоприятные условия для возникновения феррорезонансных колебаний в контурах, образованных нелинейными индуктивностями  $TН$  и емкостями фаз относительно земли, которые часто являются причинами повреждения  $TН$  [1, 2].

Использование  $TН$  без заземления нейтрали первичной обмотки смягчает режимы работы трехфазного  $TН$  в экстремальных условиях и снижает вероятность выхода из строя при однофазных замыканиях. Кроме того, можно отказаться от трехфазных трансформаторов типа НТМИ и для цепей, не связанных с защитой от однофазных замыканий на землю, использовать на генераторном напряжении однофазные  $TН$ , включенные по схеме неполного треугольника.

В случаях, когда заземление нейтрали  $TН$  все же необходимо, возможно использование другого варианта схемы включения трехфазного  $TН$  с заземлением нейтрали первичной обмотки через конденсатор (на рис. 4 и 5 — штрих), емкость которого должна выбираться по условиям получения приемлемой точности работы защиты по напряжению нулевой последовательности, для исключения феррорезонансных явлений и составлять несколько десятков микрофард [3]. При этом варианте схемы включения  $TН$  возможна совместная работа предлагаемого устройства и традиционной защиты по напряжению нулевой последовательности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор—трансформатор. — М.: Энергоиздат, 1982.
2. Вавин В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. — М.: Энергия, 1977.
3. Бархатов Г.В., Быков В.М., Леонов И.И., Надеждин В.В. Устройство защиты блочного генератора — Электротехника, 1978, № 3.

[24.09.98]

*Авторы: Булычев Александр Витальевич окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института в 1980 г. Защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и исследование отдельных узлов комплексной защиты генератора» в 1984 г. в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ) Докторант кафедры «Электрические станции и автоматизация энергетических систем» С.Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ).*

*Ванин Валерий Кузьмич окончил энергетический факультет Ташкентского политехнического института в 1961 г. Защитил докторскую диссертацию на тему «Релейная защита на элементах вычислительной техники» в 1990 г. в ЛПИ. Заведующий кафедрой «Электрические станции и автоматизация энергетических систем» СПбГТУ.*

### К ЧИТАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «Электричество»

Бесплатно получать оглавления нашего журнала можно через электронные сети. Эту услугу оказывает служба ИНФОМАГ, организованная в Московском физико-техническом институте. Кроме оглавлений журнала «Электричество» служба ИНФОМАГ распространяет оглавления более 80 отечественных и зарубежных научно-технических журналов, а также ряд научных электронных бюллетеней. Все материалы службы ИНФОМАГ доступны в режиме ON-LINE через сервер РосНИИРОС по следующим URL:

<http://www.ripn.net>

<gopher://gopher.ripn.net>

Для получения материалов службы ИНФОМАГ по подписке через электронную почту следует направить письмо с командой

HELP по адресу [ims@rlpn.net](mailto:ims@rlpn.net)

Полная информация о службе ИНФОМАГ может быть получена в ответ на команду HELP, направленную по адресу [infomag@lgrant.mipt.msk.su](mailto:infomag@lgrant.mipt.msk.su)

# К расчету устройства ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях

АЛЕКСАНДРОВ Г.Н.

Предложено устройство ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях с использованием быстродействующего управляемого реактора. Проанализированы его характеристики. Показано, что при применении таких устройств может быть обеспечено значительное уменьшение токов короткого замыкания без ограничения пропускной способности сети в нормальном режиме.

Ключевые слова: электрические сети, ограничение токов короткого замыкания, управляемый реактор

В электроэнергетических системах с большой установленной мощностью генераторов и низким напряжением системообразующей сети может быть весьма высокий уровень токов короткого замыкания (КЗ) — 60—80 кА, поэтому полезно рассмотреть возможность ограничения токов КЗ в таких энергосистемах.

Условно схема включения токоограничивающего устройства представлена на рис. 1. Предполагается, что вся энергосистема имеет ток КЗ:

$$I_{КЗ} = \frac{U_{\phi}}{X_N}, \quad (1)$$

где  $U_{\phi}$  — наибольшее рабочее фазовое напряжение;  $X_N$  — индуктивное сопротивление системы.

Для уменьшения тока КЗ необходимо разделить систему на две части (условно равные) токоограничивающим устройством. При этом ток КЗ ограничивается тем в большей степени, чем больше сопротивление токоограничивающего устройства. В пределе при бесконечно большом сопротивлении токоограничивающего устройства ток КЗ уменьшается в 2 раза. Если в качестве токоограничивающего устройства использовать параллельное сопротивление конденсаторной батареи и управляемого реактора, то можно изменять его сопротивление от емкостного сопротивления конденсаторной батареи до любого заданного заранее значения емкостного или ин-

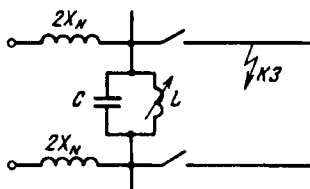


Рис. 1. Схема включения одного токоограничивающего устройства в электрическую сеть

A device is proposed for limiting short-circuit currents in electrical networks with the use of high-speed controlled shunting reactor. Characteristics of the device proposed are analysed. It is shown that by using such devices it is possible to significantly reduce short-circuit currents without limitation of the network transfer capability under normal operating conditions.

Key words: electrical networks, limitation of short-circuit currents, control shunting reactor

дуктивного сопротивления в зависимости от соотношения емкостного и индуктивного сопротивлений токоограничивающего устройства (ТОУ):

$$X_{\Sigma} = \frac{X_C X_L}{X_C + X_L}. \quad (2)$$

Результаты расчетов по формуле (2) приведены на рис. 2. Как видно, при отношении  $X_L/X_C > 1$  эквивалентное сопротивление ТОУ имеет емкостный характер, а минимальное сопротивление ТОУ равно емкостному сопротивлению. Напротив, при  $X_L/X_C < 1$  эквивалентное сопротивление ТОУ имеет индуктивный характер, а при  $X_L/X_C < 0,5$  оно становится меньше ем-

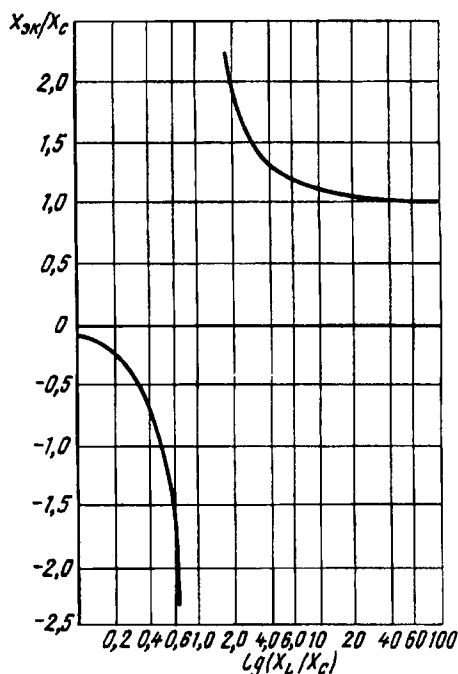


Рис. 2. Зависимость относительного значения эквивалентного сопротивления ТОУ от отношения его индуктивного и емкостного сопротивлений

костного сопротивления.

Емкостное сопротивление ТОУ может быть определено из условия ограничения падения напряжения на нем  $\Delta U$  в режиме максимальной нагрузки нормального режима, принимая в качестве максимального тока ток

$$I_{\max} = K_d I_H, \quad (3)$$

где  $K_d$  — допустимое отношение максимального тока к натуральному  $I_H$ :

$$K_d I_H X_C \leq \Delta U_{\text{доп}} = -\alpha U_\phi, \quad (4)$$

откуда

$$X_C = -\frac{\alpha U_\phi}{K_d I_H} = -\frac{\alpha z_B}{K_d}, \quad (5)$$

где  $z_B = U_\phi / I_H$  — волновое сопротивление линии.

Поскольку индуктивное и емкостное сопротивления имеют разные знаки, то с учетом (2), (5) получаем

$$X_3 = \frac{X_C X_L}{X_C + X_L} = \frac{-\alpha z_B X_L}{K_d X_L - \alpha z_B}. \quad (6)$$

Если сопротивление реактора  $X_L = \alpha z_B / K_d$ , то

$$X_3 = -\frac{(\alpha z_B)^2}{K_d 0} = -\infty.$$

При этом две части системы полностью теряют электрическую связь, ток КЗ определяется только той частью системы, в которой произошло КЗ, и он равен половине максимального тока КЗ, а напряжение на ТОУ равно номинальному фазовому напряжению системы. Это не всегда целесообразно. Поэтому необходимо рассмотреть промежуточные варианты и выбрать наиболее целесообразный.

Эквивалентное сопротивление системы в месте КЗ равно (см. рис. 1)

$$X_{N3} = \frac{2X_N(2X_N + X_3)}{2X_N + 2X_N + X_3} = 2X_N \frac{2X_N + X_3}{4X_N + X_3}. \quad (7)$$

При этом ток КЗ в системе с ТОУ

$$I_{K3I} = \frac{U_\phi}{X_{N3}} = \frac{U_\phi}{2X_N} \frac{4X_N + X_3}{2X_N + X_3} = \beta I_{K3}, \quad (8)$$

где

$$\beta = \frac{I_{K3I}}{I_{K3}} = \frac{1}{2} \frac{4X_N + X_3}{2X_N + X_3} = \frac{4X_N + X_3}{4X_N + 2X_3}. \quad (9)$$

Решая уравнение (9) относительно эквивалентного сопротивления ТОУ, получаем

$$X_3 = 4X_N \frac{1-\beta}{2\beta-1}. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет получить необходимое значение  $X_3$  при любом требуемом токе

ограничении  $\beta$ . Приравнявая формулы (6) и (10), получаем уравнение для определения необходимого сопротивления реактора  $X_L$  в режиме КЗ системы:

$$4X_N \frac{1-\beta}{2\beta-1} = \frac{X_L X_C}{X_L + X_C} = -\frac{\alpha z_B X_L}{K_d X_L - \alpha z_B},$$

решение которого получаем в виде

$$\begin{aligned} X_L &= \frac{4X_N(1-\beta)X_C}{(2\beta-1)X_C - 4X_N(1-\beta)} = \\ &= z_B \frac{4X_N\alpha(1-\beta)}{4X_N K_d(1-\beta) + \alpha z_B(2\beta-1)}, \end{aligned} \quad (11)$$

откуда следует, что при  $\beta=1$  (ток КЗ не ограничивается)  $X_L=0$ ; напротив, при  $\beta=0,5$   $X_L=\alpha z_B/K_d$ .

Соответственно отношение абсолютных значений индуктивного и емкостного сопротивлений ТОУ в режиме КЗ равно

$$\begin{aligned} \left| \frac{X_L}{X_C} \right| &= \frac{4X_N(1-\beta)K_d}{4X_N K_d(1-\beta) + \alpha z_B(2\beta-1)} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\alpha z_B}{4X_N K_d} \frac{2\beta-1}{1-\beta}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Ток через ТОУ определим при делении фазного напряжения на сумму сопротивлений части системы  $2X_N$  и эквивалентного сопротивления ТОУ:

$$I_{\text{ТОУ}} = \frac{U_\phi}{2X_N + X_3} = \frac{U_\phi}{2X_N + 4X_N \frac{1-\beta}{2\beta-1}} = \frac{U_\phi}{2X_N} (2\beta-1). \quad (13)$$

Следовательно, при  $\beta=1$  ток через ТОУ равен половине тока КЗ системы, а при  $\beta=0,5$   $I_{\text{ТОУ}}=0$ .

Напряжение на ТОУ [с учетом (10) и (13)]

$$\Delta U_{\text{ТОУ}} = I_{\text{ТОУ}} X_3 = 2U_\phi(1-\beta). \quad (14)$$

Относительное значение падения напряжения на ТОУ (по отношению к падению напряжения в номинальном режиме)

$$\frac{\Delta U_{\text{ТОУ}}}{\alpha U_\phi} = \frac{2}{\alpha} (1-\beta).$$

Напряжение на токоограничивающем устройстве повышается кратковременно в течение времени срабатывания выключателя (не более 100 мкс). На это время допустимо повышение напряжения до пятикратного по отношению к номинальному, поэтому номинальное напряжение конденсатора ТОУ равно

$$U_{\text{ТОУном}} = 0,2 \Delta U_{\text{ТОУ}} = 0,4 U_\phi (1-\beta)$$

и

$$\frac{U_{\text{ТОУном}}}{\alpha U_{\Phi}} = \frac{0,4}{\alpha} (1 - \beta).$$

В таблице приведены значения отношения  $\Delta U_{\text{ТОУном}}/\alpha U_{\Phi}$  при различных значениях  $\alpha$ .

Значения $\beta$	Значение $\Delta U_{\text{ТОУном}}/\alpha U_{\Phi}$		
	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,15$
0,5	4,0	2,0	1,33
0,6	3,2	1,6	1,07
0,7	2,4	1,2	0,80
0,8	1,6	0,8	0,53
0,9	0,8	0,4	0,27
1,0	0	0	0

Полученные соотношения для случая разделения системы на две равные части могут быть обобщены на случай произвольного числа равных частей системы, разделенных одинаковыми токоограничивающими устройствами (см. рис. 3). В этом случае эквивалентное сопротивление системы в месте КЗ равно

$$\begin{aligned} X_{N3} &= \frac{(n+1)X_N \frac{1}{n} [(n+1)X_N + X_3]}{(n+1)X_N + \frac{1}{n} [(n+1)X_N + X_3]} = \\ &= (n+1)X_N \frac{(n+1)X_N + X_3}{(n+1)^2 X_N + X_3}. \end{aligned} \quad (15)$$

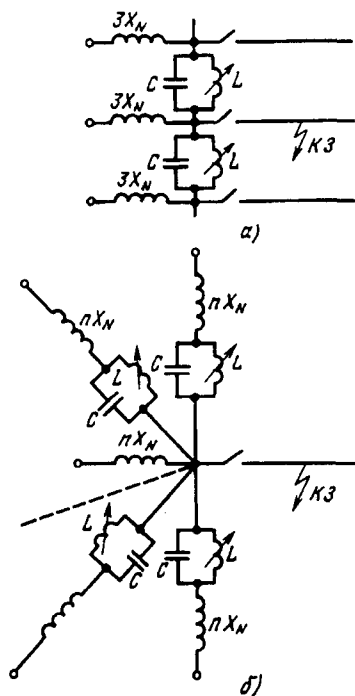


Рис. 3. Схемы включения двух (а) и более (б) токоограничивающих устройств в электрическую сеть

Ток КЗ в системе с ТОУ

$$I_{K3l} = \frac{U_{\Phi}}{X_{N3}} = \frac{U_{\Phi}}{(n+1)X_N} \frac{(n+1)^2 X_N + X_3}{(n+1)X_N + X_3} = \beta \frac{U_{\Phi}}{X_N} = \beta I_{K3}, \quad (16)$$

откуда

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{I_{K3l}}{I_{K3}} = \frac{1}{n+1} \frac{(n+1)^2 X_N + X_3}{(n+1)X_N + X_3} = \\ &= \frac{1}{n+1} \frac{1 + (n+1)^2 \frac{X_N}{X_3}}{1 + (n+1) \frac{X_N}{X_3}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Следовательно, при настройке всех ТОУ в резонанс на промышленной частоте ( $X_3 = \infty$ )  $\beta = 1/(n+1)$ .

Таким образом, при увеличении числа ТОУ  $n$  в системе уменьшается нижний уровень тока КЗ в системе обратно пропорционально  $n+1$ .

Разрешая уравнение (17) относительно эквивалентного сопротивления ТОУ, получаем

$$X_3 = (n+1)^2 X_N \frac{1 - \beta}{(n+1)\beta - 1}, \quad (18)$$

откуда можно получить  $X_3$ , необходимое для обеспечения любого ограничения токов КЗ в пределах от  $\beta = \frac{1}{n+1}$  до  $\beta = 1$ .

Приравнявая формулы (6) и (18), получаем уравнение

$$(n+1)^2 X_N \frac{1 - \beta}{(n+1)\beta - 1} = - \frac{\alpha z_B X_L}{K_d X_L - \alpha z_B},$$

решение которого получаем в виде

$$\begin{aligned} X_L &= \alpha z_B \frac{(n+1)^2 X_N (1 - \beta)}{(n+1)^2 K_d X_N (1 - \beta) - \alpha z_B [1 - (n+1)\beta]} = \\ &= \frac{\alpha z_B}{K_d} \frac{1}{1 - \frac{\alpha z_B}{K_d X_N} \frac{1 - (n+1)\beta}{(n+1)^2 (1 - \beta)}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Следовательно, при  $\beta = 1$   $X_L = 0$ , при  $\beta = \frac{1}{n+1}$   $X_L = \alpha z_B / K_d$ .

Ток через ТОУ

$$\begin{aligned} I_{\text{ТОУ}} &= \frac{U_{\Phi}}{(n+1)X_N + X_3} = \frac{U_{\Phi}}{(n+1)X_N + (n+1)^2 X_N \frac{1 - \beta}{(n+1)\beta - 1}} = \\ &= \frac{U_{\Phi}}{nX_N} \frac{(n+1)\beta - 1}{n+1} = \frac{U_{\Phi}}{nX_N} \left( \beta - \frac{1}{n+1} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

При  $\beta = 1$

$$I_{\text{ТОУ}} = \frac{U_{\Phi}}{(n+1)X_N}; \quad (21)$$

при  $\beta = \frac{1}{n+1}$   $I_{\text{ТОУ}} = 0$ .

Согласно (10), (20) напряжение на ТОУ

$$\Delta U_{\text{ТОУ}} = I_{\text{ТОУ}} X_3 = \frac{n+1}{n} U_{\Phi} (1 - \beta). \quad (22)$$

При  $\beta = 1$   $\Delta U_{\text{ТОУ}} = 0$ ; при  $\beta = \frac{1}{n+1}$

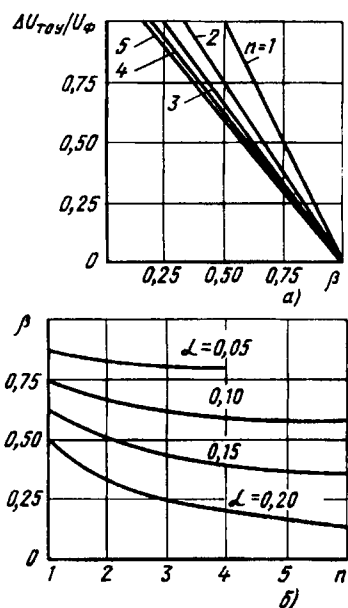


Рис. 4. Зависимости относительного значения падения напряжения на ТОУ от степени ограничения тока КЗ: а — при различном числе ТОУ в сети; б — при различных значениях  $\alpha$

$$\Delta U_{\text{ТОУ}} = U_{\phi} \frac{n+1}{n} \left( 1 - \frac{1}{n+1} \right) = U_{\phi} \cdot \beta$$

Формула (22) позволяет определить относительное повышение напряжения в зависимости от требуемой степени ограничения тока КЗ  $\beta$  и числа ТОУ (см. рис. 4,а). Как видно, при уменьшении  $\beta$  напряжение на ТОУ быстро нарастает. Увеличение числа ТОУ приводит к снижению напряжения на ТОУ.

Задавая допустимое максимальное повышение напряжения на ТОУ (по сравнению с рабочим фазовым напряжением), можно получить зависимость возможного ограничения тока КЗ от числа ТОУ и согласно (22)

$$\beta_{\min} = 1 - \left( \frac{\Delta U_{\text{ТОУ}}}{U_{\phi}} \right)_{\text{доп}} \frac{n}{n+1}. \quad (23)$$

На рис. 5 приведены результаты расчетов по формуле (23). Как видно, при допустимом напряжении на ТОУ, равном фазовому напряжению, может быть достигнуто весьма глубокое ог-

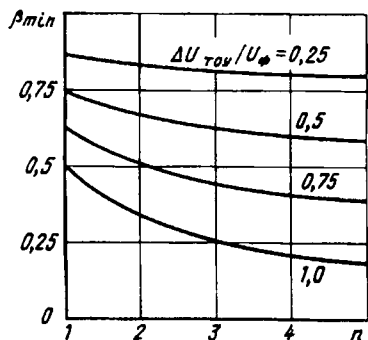


Рис. 5. Зависимости степени ограничения тока КЗ в сети от числа ТОУ при различных отношениях  $\Delta U_{\text{ТОУ}}/U_{\phi}$

раничение токов КЗ в системе. При ограничении напряжения на ТОУ ( $\Delta U_{\text{ТОУ}} = 0,5 U_{\phi}$ )  $\beta_{\min} \approx 0,5$  при  $n \geq 3$ . В принципе ТОУ может быть сконструировано на любое напряжение. Однако, чем больше допустимое напряжение на ТОУ, тем оно сложнее и дороже. Поэтому выбор оптимальной степени ограничения токов КЗ в сети представляет собой технико-экономическую задачу.

С учетом допустимости пятикратного кратковременного повышения напряжения на конденсаторах номинальное напряжение конденсаторной батареи

$$U_{\text{ТОУном}} = 0,2 \Delta U_{\text{ТОУ}} = 0,2 U_{\phi} \frac{n+1}{n} (1 - \beta)$$

и

$$K = \frac{U_{\text{ТОУном}}}{\alpha U_{\phi}} = \frac{0,2}{\alpha} \frac{n+1}{n} (1 - \beta).$$

Из последнего соотношения можно определить зависимость степени ограничения тока КЗ системы от числа ТОУ при  $U_{\text{ТОУном}} = K \alpha U_{\phi}$  и различных значениях  $\alpha$ :

$$\beta = 1 - 5 \alpha K \frac{n}{n+1}.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 4,б. Как видно, при ограничении перепада напряжения на ТОУ в номинальном режиме на уровне  $\alpha = 0,05$  и при использовании батареи конденсаторов, работающей при номинальном напряжении в нормальном режиме работы системы, ток КЗ может быть ограничен в пределах 20%. При увеличении допустимого перепада напряжения на ТОУ в нормальном режиме эффективность ТОУ резко возрастает. При этом наиболее эффективно применение двух-трех ТОУ. Дальнейшее увеличение ТОУ мало эффективно. Следует заметить, что увеличение номинального напряжения ТОУ по отношению к максимальному падению напряжения на нем в нормальном режиме так же эффективно, как и увеличение допустимого перепада напряжения в нормальном режиме.

Данные рис. 4,а подтверждают эффективность применения предлагаемого ТОУ для ограничения токов КЗ в энергосистеме, особенно при установке в ней двух-трех ТОУ.

Управляемый реактор для ТОУ может быть рассчитан достаточно просто. В нормальном режиме работы энергосистемы напряжение на реакторе минимально и равно  $\alpha U_{\phi}$ . Вторичная обмотка реактора разомкнута, что соответствует холостому ходу реактора. При этом индуктивное сопротивление реактора на два порядка больше, чем емкостное сопротивление параллельного конденсатора. Поэтому ток через сетевую обмотку реактора чрезвычайно мал: на два порядка мень-

ше номинального тока. При этом справедливо соотношение

$$\sqrt{2} \alpha U_{\Phi} = 2\pi f B_0 N_1 F_{\text{ст}},$$

где  $B_0$  — индукция в основном стержне, расположенном внутри обмотки управления (ОУ);  $f$  — угловая частота напряжения;  $N_1$  — число витков сетевой обмотки (СО), включаемой в расщелку токоведущей цепи;  $F_{\text{ст}}$  — эффективное сечение стержня.

При известном числе витков СО сечение основного стержня

$$F_{\text{ст}} = \frac{\sqrt{2} \alpha U_{\Phi}}{2\pi f B_0 N_1}.$$

Относительно малое значение напряжения на СО реактора определяет небольшое сечение основного сердечника при  $B_0 \approx 1,65$  Тл.

При КЗ в сети ОУ реактора замыкается тиристорным блоком накоротко. Индуктивное сопротивление реактора уменьшается на два порядка в соответствии с формулой (19). При этом ток в сетевой обмотке резко возрастает, достигая значения

$$I_{1\text{ном}} = \frac{\Delta U_{\text{ТОУ}}}{X_L} = \frac{K_d U_{\Phi}}{z_b} \frac{(n+1)}{n\alpha} \times \left[ 1 - \beta + \frac{\alpha z_b}{X_N} \frac{(n+1)\beta - 1}{(n+1)^2} \right]. \quad (24)$$

$$\text{При } \beta = \frac{1}{n+1}$$

$$I_{1\text{ном}} = \frac{K_d}{\alpha} \frac{U_{\Phi}}{z_b} = \frac{K_d}{\alpha} I_H;$$

при  $\beta = 1$

$$I_{1\text{ном}} = \frac{K_d U_{\Phi}}{(n+1)X_N} = I_{\text{КЗ}} \frac{K_d}{n+1}.$$

Мощность реактора в режиме КЗ сети согласно (22) и (24) равна

$$Q = \Delta U_{\text{ТОУ}} I_{1\text{ном}} = \frac{K_d U_{\Phi}^2}{z_b} (1 - \beta) \times \left[ 1 - \beta + \frac{\alpha z_b}{X_N} \frac{(n+1)\beta - 1}{(n+1)^2} \right]. \quad (25)$$

В этом режиме магнитный поток практически полностью вытесняется из объема внутри ОУ. Соответственно магнитный поток в стержне практически отсутствует. Эффективное сечение магнитного потока вне основного стержня в межобмоточном зазоре и в объеме, занятом обмотками, равно

$$F_b = \pi \left\{ d_{12} \left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) + \frac{1}{2} (a_1 - a_2) \left[ a_{12} + \frac{2}{3} (a_1 + a_2) \right] \right\},$$

где  $d_{12}$  — средний диаметр зазора;  $a_{12}$  — его

радиальный размер;  $a_1$  и  $a_2$  — радиальные размеры (толщины) СО и ОУ.

Соответственно полный магнитный поток вне основного стержня

$$\Phi = B_m F_b,$$

где индукция в межобмоточном зазоре определяется соотношением

$$\sqrt{2} I_{1\text{ном}} N_1 = \frac{B_m l_0}{\mu_0}, \quad (26)$$

где  $I_{1\text{ном}}$  — действующее значение тока через основную обмотку реактора в расчетном режиме КЗ сети;  $l_0$  — высота окна магнитопровода.

Следовательно, согласно (26) магнитный поток в номинальном режиме работы реактора

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{1\text{ном}} N_1 F_b}{l_0}.$$

Поскольку не весь этот поток сцепляется со всеми витками СО, а часть этого потока сцепляется с ОУ [1], полное число потокоцеплений с СО определяется соотношением

$$\Psi = \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{1\text{ном}} N_1^2 F_{\text{в.с}}}{l_0},$$

где

$$F_{\text{в.с}} = \pi \left[ d_{12} \left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) + \frac{1}{3} (a_1 - a_2) \times \left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right],$$

поэтому уравнение для напряжения на СО в номинальном режиме работы реактора имеет вид

$$5 \sqrt{2} K \alpha U_{\Phi} = 2\pi f \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{1\text{ном}} N_1^2 F_{\text{в.с}}}{l_0},$$

откуда определяется необходимое число витков сетевой обмотки реактора:

$$N_1 = \sqrt{\frac{5 K \alpha U_{\Phi} l_0}{2\pi f \mu_0 I_{1\text{ном}} F_{\text{в.с}}}}.$$

Здесь только одно неизвестное —  $N_1$ , поскольку все остальные переменные либо заданы ( $K$ ;  $\alpha$ ;  $U_{\Phi}$ ;  $f$ ;  $I_{1\text{ном}}$ ;  $l_0$ ), либо определяются через  $N_1$  — ( $F_{\text{в.с}}$ ).

Действительно, как показывают вычисления, наименьший расход активных материалов (меди и стали), а следовательно и наименьшая стоимость реактора, соответствует минимальной высоте обмотки, допустимой по условию надежной работы при воздействии грозовых и коммутационных перенапряжений. Следовательно высота обмотки  $l$  задана. Оптимальная ширина (радиальный размер) зазора  $a_{12}$  также соответствует минимально возможному изоляционному расстоянию между обмотками. Следовательно она также

задана.

Толщины обмоток  $a_1$  и  $a_2$  определяются соотношениями [2]:

$$a_1 = \frac{N_1 I_{1\text{ном}} K_{0.и1}}{l j_1 K_{3.и1}};$$

$$a_2 = \frac{N_2 I_{2\text{ном}} K_{0.и2}}{l j_2 K_{3.и2}} = \frac{N_1 I_{1\text{ном}}}{l j_2} \frac{K_{0.и2}}{K_{3.и2}},$$

где  $j_1$  и  $j_2$  — оптимальные плотности тока в СО и ОУ соответственно в режиме КЗ;  $K_{0.и1}$  и  $K_{0.и2}$  — коэффициенты увеличения сечения проводников с изоляцией по отношению к сечению проводов без изоляции для СО и ОУ;  $K_{3.и1}$  и  $K_{3.и2}$  — коэффициенты заполнения сечения обмоток проводниковым материалом с учетом изоляции проводов (эти коэффициенты всегда меньше единицы, так как в обмотках предусматриваются каналы охлаждения). Поскольку длительность протекания номинального тока (в режиме КЗ сети) ограничена временем работы выключателя и не превышает 100 мс, плотности тока в СО и ОУ можно допустить на уровне 100 А/мм<sup>2</sup> и более.

Второе соотношение для  $a_2$  справедливо, поскольку выполняется равенство МДС СО и ОУ:  $N_1 I_{1\text{ном}} = N_2 I_{2\text{ном}}$ .

Средний диаметр зазора определяется соотношением

$$d_{12} = d_{\text{ст}} + 2(I_{\text{ОУ-ст}} + a_2) + a_{12},$$

где  $I_{\text{ОУ-ст}}$  — изоляционный промежуток между ОУ и основным стержнем магнитопровода;  $d_{12}$  — диаметр описанной окружности основного сердечника, определяемый его эффективным сечением согласно (32):

$$d_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{ст}}}{\pi K_{3.ст}}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\sqrt{2} \alpha U_{\Phi}}{f K_{3.ст} B_0 N_1}},$$

$K_{3.ст}$  — коэффициент заполнения сечения основного стержня сталью с учетом изоляции листов стали и ступенчатой конструкции стержня.

После вычисления числа витков первичной обмотки  $N_1$  определяется число витков вторичной обмотки  $N_2$  исходя из пропускной способности коммутатора.

Повышение напряжения на коммутаторе при нарастании тока КЗ в несколько раз по сравнению с напряжением в нормальном режиме позволяет использовать в качестве коммутатора, замыкающего накоротко обмотку управления реактора, искровой промежуток в элегазе. Такой промежуток обеспечивает гашение дуги при уменьшении протекающего через ТОУ тока после отключения поврежденного участка линии выключателем.

Далее определяются все необходимые размеры реактора:  $d_{\text{ст}}$ ;  $a_1$ ;  $a_2$ ;  $d_{12}$ , внешний диаметр СО:

$$d_{\text{СО-ВН}} = d_{12} + a_{12} + 2a_1,$$

и с учетом необходимых изоляционных расстояний между СО и боковыми стержнями магнитопровода определяется горизонтальный размер окна магнитопровода. С учетом необходимых изоляционных расстояний до ярем определяется вертикальный размер окна (при заданной высоте обмоток).

Эффективное сечение ярем  $F_{\text{я}}$  и боковых стержней  $F_{\text{ст.б}}$  в реакторе броневого типа определяется несколько уменьшенным потоком  $\Phi_{\text{я}} < \Phi$ , поскольку часть потока замыкается через основной стержень [1]:

$$\Phi_{\text{я}} = \pi B_m \left[ d_{12} \left( a_{12} + \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{3} \right) + \frac{1}{2} a_{12} \times \right. \\ \left. \times \left( a_1 - \frac{2}{3} a_2 \right) + \frac{1}{3} \left( a_1^2 - \frac{1}{2} a_2^2 \right) \right],$$

откуда для реактора броневого типа

$$F_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\text{я}}}{2B_0} = F_{\text{ст.б}}.$$

После определения конфигурации ярем и боковых стержней могут быть определены размеры магнитопровода и его масса, после чего могут быть определены потери мощности в стали в режиме холостого хода реактора. Потери мощности в номинальном режиме определять не требуется, так как он кратковременный и потери мощности в реакторе могут быть только полезны для демпфирования тока КЗ.

Малый диаметр основного стержня определяет малый диаметр обмоток реактора. С учетом малости сечения обмоток (из-за большой расчетной плотности тока) можно утверждать, что реактор для ТОУ не потребует больших затрат материалов и недорог.

С учетом большой экономии средств на замену выключателей в сети экономический эффект от установки предлагаемых токоограничивающих устройств может быть очень большим.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.Н. К методике расчета управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа. — Электричество, 1998, № 4.
2. Александров Г.Н., Кашина В.А. Сравнение технико-экономических показателей неуправляемых и управляемых шунтирующих реакторов. — Электротехника, 1997, № 1.

[25.06.98]

*Автор: Александров Георгий Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1953 г. В 1967 г. защитил докторскую диссертацию «Коронный и искровой разряды на линиях электропередачи» во Всесоюзном электротехническом институте. В 1991 г. избран членом-корреспондентом Российской Академии наук. Заведующий кафедрой «Электрические и электронные аппараты» С.Петербургского государственного технического университета.*

# Автоматическая частотная разгрузка в энергетических системах

ПАВЛОВ Г.М., МЕРКУРЬЕВ А.Г., ШАРГИН Ю.М.

Рассматривается автоматическая частотная разгрузка энергетических систем. Представлен новый метод расчета снижения частоты при дефиците генерации и действии частотной разгрузки. Выбор уставок частотной разгрузки по новому методу позволяет настраивать автоматику на минимальное отклонение частоты в аварийной ситуации.

Ключевые слова: энергетические системы, нагрузка, автоматическая частотная разгрузка, моделирование

Нормальный режим энергосистем характеризуется балансом мощностей — суммарная генерация равна нагрузке энергосистемы, включая потери в сети:

$$P_G = P_H. \quad (1)$$

В нормальном режиме этот баланс сохраняется при номинальной частоте 50 Гц. При нарушении баланса мощностей происходит изменение частоты энергосистемы. Если  $P_G < P_H$ , то частота уменьшается; при  $P_G > P_H$  частота увеличивается.

Нарушение баланса мощностей может происходить как за счет изменения нагрузки энергосистемы, так и за счет изменения генерации. Нагрузка энергосистемы постоянно меняется. Это происходит вследствие изменения мощности отдельных потребителей, их отключения и включения в сеть.

Мощность отдельных потребителей невелика в сравнении с мощностью современных крупных энергосистем. Поэтому изменение мощности отдельных потребителей и даже их полное отключение или включение не приводит к заметному нарушению баланса мощностей в энергосистеме. Штатная система регулирования частоты и мощности обеспечивает баланс мощностей при частоте 50 Гц с отклонением  $\pm 0,1$  Гц.

Нарушение баланса мощностей за счет изменения генерации может быть более значительным. При аварийном отключении мощного генератора, а тем более целой станции, дефицит мощности может быть очень большим. Автоматические регуляторы частоты на агрегатах станции придут в действие и будут стремиться поддерживать частоту системы. Однако дефицит мощности может быть больше вращающегося резерва и частота будет продолжаться снижаться.

В аварийной ситуации приходится допускать

The paper considers principles of under frequency load shedding of power systems. A new method for calculating the reduction in frequency under the deficit of generation and the action of under frequency load shedding is presented. The choice of frequency load shedding settings in accordance with the new method makes it possible to tune automation to the minimum frequency deviation under emergency conditions.

Key words: power systems, load, automatic under frequency load shedding, simulation

значительное отклонение частоты [2]. На рис. 1 отмечена допустимая зона аварийного снижения частоты и допустимая длительность этого отклонения. За пределами зоны режим недопустим.

Поскольку восстановление частоты не может быть получено за счет нормальных средств регулирования, то в этом случае приходится прибегать к аварийному мероприятию — автоматической разгрузке по частоте (АЧР). Аварийная частотная разгрузка является вынужденным мероприятием по отключению ряда потребителей с целью поддержания частоты энергосистемы, близкой к номинальному значению.

На рис. 2 показана структурная схема работы турбогенератора на энергосистему. Первичным двигателем агрегата является турбина, которая управляется регулятором частоты. Генератор преобразует механическую мощность турбины в электрическую энергию и выдает ее в энергосистему. Для упрощения на рис. 2 показан один агрегат энергосистемы, остальные условно изображены пунктирными линиями ( $P_{Гн}$ ).

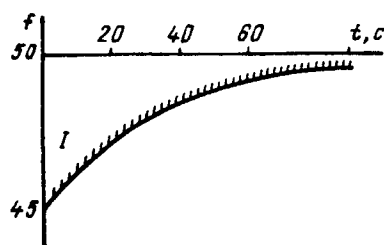


Рис. 1. График отклонения частоты: I — допустимая зона аварийного отклонения частоты

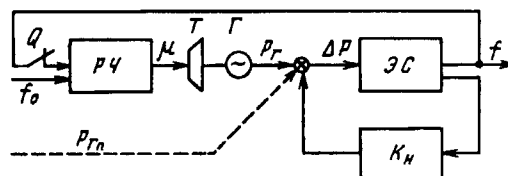


Рис. 2. Структурная схема работы агрегата на энергосистему: РЧ — регулятор частоты; ЭС — энергосистема

На энергосистему воздействует  $\Delta P = P_r - P_n$ . В стационарном режиме  $\Delta P = 0$  и на выходе энергосистемы поддерживается номинальная частота 50 Гц. Нагрузка энергосистемы обладает регулирующим эффектом — при снижении частоты потребление нагрузки уменьшается. Эта зависимость учитывается так:  $\Delta P = K_n \Delta f$ , где  $K_n = \Delta P / \Delta f$  — регулирующий эффект нагрузки. На структурной схеме регулирующий эффект учтен в виде обратной связи по отношению к энергосистеме.

Если  $\Delta P$  невелико, то снижение частоты происходит по графику 1 (рис. 3). Автоматическая система регулирования частоты за счет достаточного вращающегося резерва восстановит частоту на номинальном уровне.

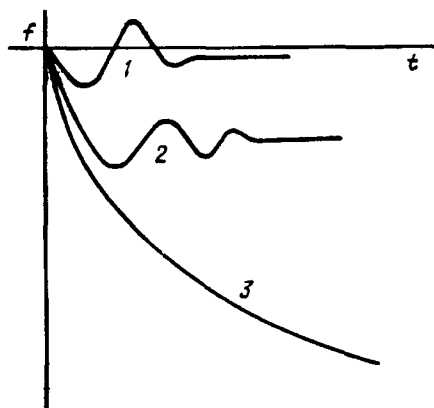


Рис. 3. График снижения частоты в нормальном и аварийном состоянии энергосистемы

Вращающийся резерв может быть недостаточным для покрытия возникшего дефицита генерации. Штатная система регулирования частоты придет в действие, но «вытянуть» частоту до номинальной не представляется возможным (кривая 2). При полном отсутствии вращающегося резерва снижение частоты будет происходить по кривой 3.

Аварийный дефицит генерации возможен в пределах 10–20% и даже 40–50%. Это намного больше вращающегося резерва системы, поэтому для упрощенного анализа резервом пренебрегают. В такой постановке контур регулятора частоты вращения бездействует, что учтено отключением ключа  $Q$  на входе регулятора (рис. 2).

Входным воздействием для энергосистемы является  $\Delta P$ . Выходная величина — частота  $f$ . Уравнение энергосистемы

$$T_j \frac{df}{dt} + K_n \Delta f = \Delta P, \quad (2)$$

где  $T_j$  — постоянная времени энергосистемы.

Сразу после возникновения  $\Delta P$  дополнительное воздействие расходуется на ускорение энергосистемы:

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\Delta P}{T_j},$$

откуда

$$\Delta P = T_j \left. \frac{df}{dt} \right|_{t=0}.$$

Создается заманчивая идея определить значение аварийного дефицита генерации по первой производной  $df/dt|_{t=0}$ . Практическая реализация этой идеи невозможна, что подробнее рассмотрено в [5]. Разгрузку производят ступенями — отключают небольшую часть потребителей и следят за ходом снижением частоты в энергосистеме. При необходимости прибегают к очередной ступени отключения и т.д. Способ разгрузки рассматривается на рис. 4.

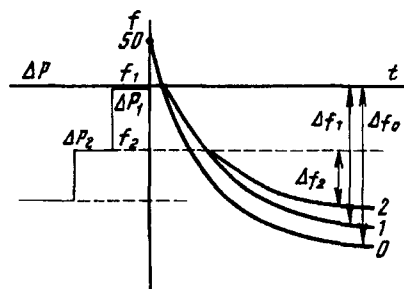


Рис. 4. Ступенчатое отключение потребителей

Начинают разгружать при частоте  $f_1$ , отключая определенную долю потребителей  $\Delta P_1$ . При отсутствии АЧР снижение частоты происходит по экспоненте (кривая 0, рис. 4):

$$\Delta f_0 = \frac{-\Delta P}{K_n} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_j}} \right), \quad (3)$$

где  $\Delta P$ ,  $\Delta f$  — в отн. ед.;  $T_j$  — постоянная времени энергосистемы с учетом регулирующего эффекта нагрузки.

После действия первой ступени разгрузки снижение частоты пойдет по кривой 1. Очевидна потребность действия последующих ступеней разгрузки с отключением потребителей  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  и т.д.

При срабатывании некоторой  $i$ -й ступени снижение частоты прекратится и действия последующих ступеней не потребуется. Таким образом решена первая часть задачи — приостановлено дальнейшее снижение частоты. Эта задача решается за счет устройства автоматики АЧР-I. Дальнейший подъем частоты до заданного значения возложен на вторую часть автоматики АЧР-II. Подъем частоты производится также за счет отключения потребителей по соответствующей программе.

Алгоритм действия АЧР-I и АЧР-II широко используется во всех энергосистемах России и

за рубежом [1, 3].

Несмотря на кажущуюся простоту АЧР при ступенчатой работе автоматики ее анализ затруднен. Снижение частоты после действия  $i$ -й очереди не может быть рассчитано без предварительного расчета динамики снижения частоты за счет всех предыдущих очередей. По этой причине не может быть установлена аналитическая зависимость переходного процесса  $\Delta f(\Delta P, K_H, T_j)$  и невозможно выяснить влияние основных факторов, воздействующих на этот процесс.

Для теоретических исследований в [4, 5] предложено использовать идеализированную модель частотной разгрузки в виде разгрузки с бесконечно большим числом очередей. На модели очередное отключение происходит при бесконечно малом снижении частоты  $df$  и производится отключение потребителей на бесконечно малую величину  $dP$ . Вводится понятие плотности разгрузки  $K_p = dP/df$ . При  $K_p = \text{const}$  характеристика разгрузки превращается в прямую линию, показанную на рис. 5.

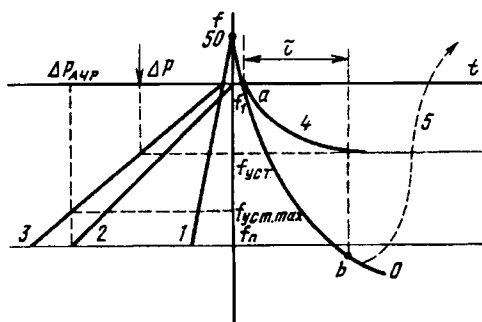


Рис. 5. Характеристика идеализированного варианта АЧР

Значение разгрузки определяется выражением  $\Delta P = \frac{dP}{df} \Delta f$  или  $\Delta P = K_p \Delta f$ . В уравнении энергосистемы совместно с автоматикой это следует учесть:

$$T_j \frac{df}{dt} + K_H \Delta f + K_p \Delta f = \Delta P$$

или

$$T_j \frac{df}{dt} + (K_H + K_p) \Delta f = \Delta P. \quad (4)$$

Снижение частоты определяется выражением

$$\Delta f_1 = \frac{-\Delta P + 2K_H(50 - f_1)}{K_H + K_p} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_j''}}\right), \quad (5)$$

где  $T_j'' = T_j / (K_H + K_p)$  — постоянная времени энергосистемы с учетом разгрузки.

Регулирующий эффект нагрузки для разных энергосистем лежит в пределах  $K_H = 1 \div 3$ . Для наших расчетов выберем среднее значение  $K_H = 2$ .

Плотность разгрузки  $K_p = \Delta P_{АЧР} / \Delta f_{АЧР}$ , где  $\Delta P_{АЧР}$  — суммарная мощность потребителей энергосистемы, присоединенная к устройствам АЧР-I;  $\Delta f_{АЧР} = f_1 - f_n$  — частотный диапазон разгрузки. Обычно  $f = 48,5$  Гц;  $f_n = 46,5$  Гц, поэтому  $\Delta f_{АЧР} = 48,5 - 46,5 = 2$  Гц (или  $\Delta f_* = 4\%$ ).

Мощность отключаемых потребителей выбирается не менее максимально возможного дефицита генерации. Пусть этот дефицит оценивается в 30%. В таком случае к устройствам автоматики АЧР-I следует присоединить не менее 30% потребителей энергосистемы. При принятых  $\Delta P_{АЧР}$  и  $\Delta f_{АЧР}$  имеем  $K_p = \Delta P_{АЧР} / \Delta f_{АЧР} = 30/4 = 7,5$ .

Плотность разгрузки оказывает существенное влияние на процесс снижения частоты. Так из формулы (5) следует, что установившееся отклонение ( $t = \infty$ )

$$\Delta f_{уст} = \frac{-\Delta P_{уст} + 2K_H(50 - f_1)}{K_H - K_p}. \quad (6)$$

Время переходного процесса определяется постоянной времени  $T_j'' = T_j / (K_H - K_p)$ . При  $T_j = 10$  с;  $K_H = 2,0$  и  $K_p = 7,5$  имеем  $T_j'' \approx 1,0$  с. Переходный процесс завершится ориентировочно за  $3T_j''$ , т.е. за 3 с. В этой связи не оправдана задержка действия АЧР-II, выбираемая в пределах 10–20 с [1].

Построение переходного процесса при  $\Delta P < \Delta P_{АЧР}$  представлено на рис. 5, где показаны характеристика снижения потребления из-за регулирующего эффекта нагрузки (прямая 1), характеристика уменьшения потребления вследствие отключения нагрузки действием АЧР (прямая 2) и характеристика 3, определяющая суммарный эффект уменьшения потребления при снижении частоты.

Процесс снижения частоты происходит следующим образом. Сразу после возмущения  $\Delta P$  частота будет снижаться по экспоненте 0 с постоянной времени  $T_j'$ . Начиная с точки а, действует АЧР, и снижение частоты произойдет по экспоненте 4 с постоянной времени  $T_j''$ . Построение переходного процесса весьма простое, что облегчает анализ поведения АЧР при любых значениях  $\Delta P$ .

Из рис. 5 видно, что при выбранной настройке АЧР срабатывают не все очереди — ниже значения  $f_{уст.max}$  частота не опускается.

На структурной схеме энергосистемы (рис. 6,а) канал разгрузки учитывается обратной связью с коэффициентом  $K_p$ . В этом канале присутствует запаздывание, обусловленное реле времени и задержкой в срабатывании выключателя. Это запаздывание учтено звеном 4 с передаточной функцией  $W_4(p) = e^{-\tau p}$ . Характеристика звена показана на рис. 6,б.

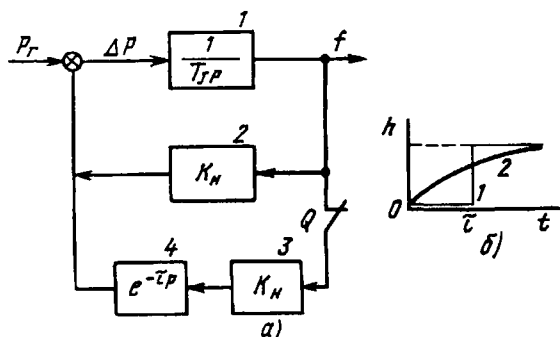


Рис. 6. Структурная схема энергосистемы с АЧР (а) и характеристика элемента запаздывания (б)

Выясним влияние запаздывания на действие АЧР. Пусть срабатывание первой очереди происходит в точке  $a$  (рис. 5) при частоте  $f_1$ , а окончательное отключение потребителей произойдет с задержкой на  $\tau$ , т.е. эффект от отключения проявится только в точке  $b$ . За счет запаздывания сработают все очереди АЧР, что приведет к перерегулированию — процесс изменения частоты будет происходить по кривой 5.

Для количественной оценки перерегулирования характеристику звена 4 представим в виде элемента с передаточной функцией  $W(p) = 1/(\tau p + 1)$ . В таком случае передаточная функция энергосистемы с учетом действия каналов обратной связи по рис. 6

$$W(p) = \frac{\tau p + 1}{(T_{jP} + K_N)(\tau p + 1) + K_p}.$$

Характер переходного процесса определится характеристическим уравнением:

$$T_j \tau p^2 + (T_j + K_N \tau) + K_N + K_p = 0.$$

Колебательность процесса возникает при наличии комплексных корней, т.е.

$$(T_j + K_N \tau)^2 \leq 4(K_N + K_p) T_j \tau.$$

Поскольку  $K_N \tau \ll T_j$ , условие колебательности можем записать так:

$$\tau \geq \frac{T_j}{4(K_N + K_p)}. \quad (7)$$

Если  $T_j = 10$  с и  $K_N + K_p = 10$ , то при  $\tau \geq 0,25$  с процесс будет колебательным.

Устройство АЧР действует односторонне — только отключает потребителей при снижении частоты. При повышении частоты включение потребителей не происходит. На структурной схеме это учтено в виде ключа  $Q$ , который разрывает цепь при  $df/dt > 0$ .

Если частота будет больше  $f_{уст}$ , то это при-

водит к неопределенности настройки АЧР-I и особенно АЧР-II.

Из формулы (7) видно влияние  $K_p$  на допустимое запаздывание  $\tau$  — чем выше  $K_p$ , тем меньше допустимое время запаздывания  $\tau$ . Ранее показано, что для снижения установившегося значения частоты после действия АЧР-I следует увеличивать коэффициент  $K_p$ . Это положительный фактор, но необходимо помнить и о влиянии  $K_p$  на перерегулирование при действии АЧР-I.

Экспонента  $\exp(-\tau p)$  может быть записана в виде

$$e^{-\tau p} = \frac{1}{1 + \tau p + \frac{\tau^2}{2!} p^2 + \frac{\tau^3}{3!} p^3 + \dots + \frac{\tau^n}{n!} p^n}.$$

Для упрощенного анализа мы принимали передаточную функцию  $W(p) = 1/(\tau p + 1)$ . Более полные исследования переходных процессов с моделированием  $\exp(-\tau p)$  полиномом четвертого порядка проведены на ЭВМ с использованием математических программ Mathcad и Matlab.

Анализировались переходные характеристики исследуемой системы, которые получаются как обратное преобразование Лапласа от произведения передаточной функции системы и передаточной функции единичного воздействия:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{p} W(p) \right\},$$

где  $W(p)$  — передаточная функция исследуемой системы;  $1/p$  — передаточная функция единичного скачка.

Переходные характеристики построены для разных значений параметров исследуемой системы. Анализ этих характеристик позволяет выяснить влияние этих параметров и сделать рекомендации по настройке частотной разгрузки с целью получения заданного переходного процесса.

На модели проведены исследования при наличии вращающегося резерва в энергосистеме. Вращающийся резерв генерации на гидроэлектростанциях из-за медленного действия регуляторов частоты используется очень медленно и не оказывает существенного влияния на снижение частоты в аварийной ситуации. Система регулирования частоты на тепловых электростанциях более быстродействующая. Наличие резерва на ТЭС положительно влияет на уменьшение понижения частоты в аварийной ситуации.

Исследования на ЭВМ обладают большими возможностями. Многие исследования уже выполнены на кафедре электрических станций СПбГТУ. Материал этих исследований выходит за рамки статьи и здесь не приводится.

**Заключение.** Предложенная идеализированная модель автоматической частотной разгрузки с бесконечно большим числом ступеней разгрузки значительно упрощает анализ статики и динамики действия АЧР, позволяет установить аналитическую зависимость снижения частоты от плотности разгрузки, запаздывания в канале отключения и т.д. Раскрытие этой зависимости позволяет настраивать действие АЧР на минимальное отклонение частоты и длительность переходного процесса в аварийных условиях. Практическая реализация несомненно осуществляется с конечным числом ступеней разгрузки.

На модели сравнительно легко просматриваются переходные процессы в энергосистеме при действии АЧР, особенно при использовании математических программ Mathcad и Mathlab. Применение программ упрощает построение переходных характеристик, дальнейший анализ и настройку АЧР на заданный переходный процесс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабинович Р.С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. — М.: Энергия, 1980.
2. Савалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Калюжный А.Х. Повышение эффективности работы автоматической частотной разгрузки. — Электрические станции, 1995, № 2.
4. Pavlov G.M. Under-Frequency load shedding in Power

System. — Proceedings, Curitiba, Copel. — CIGRE: Brasil, 1994.

5. Pavlov G.M. Under-Frequency load shedding in Power System. Textbook. — St. Petersburg: Technical University, 1997.

6. Павлов Г.М., Меркурьев А.Г. Частотная разгрузка энергосистем. Учебное пособие. — С.Петербург: Изд. СЗФ ОАО «ГВЦ Энергетики», 1998.

[24.09.98]

*Авторы: Павлов Геннадий Михайлович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1949 г. В 1966 г. защитил докторскую диссертацию по оптимизации режимов энергосистемы по активной мощности. Профессор кафедры электрических станций электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ).*

*Меркурьев Андрей Геннадиевич окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1984 г. Зам. директора Северо-Западного филиала ОАО «ГВЦ Энергетики».*

*Шаргин Юрий Макарович окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1974 г. В 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию по электромеханическим переходным процессам в узлах нагрузки. Доцент кафедры электрических станций электромеханического факультета СПбГТУ.*

### Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов стран СНГ и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира на русском и английском языках. Реклама в черно-белом изображении может быть помещена на страницах журнала или на его обложке. Напоминаем наш адрес: 103012 Москва, К—12, Б. Черкасский пер., 2/10 или 101000 Москва, Главпочтамт, абонementный ящик № 648. Телефоны для справок: 924-24-80, 928-88-69.

# Методология оптимизации параметров систем токосъема электрических машин

ЗАБОИН В.Н.

*Излагается методология оптимизации энергетических, габаритных и ресурсных параметров многощеточных систем токосъема электрических машин, основанная на использовании многофакторных мультипликативных математических моделей электрических и механических характеристик скользящего электрического контакта. Рассмотрены принципы построения алгоритма векторной оптимизации числа щеток в системе и усилий нажатия на них из условий обеспечения задаваемого минимума разности допустимых и расчетных значений суммарных потерь в системе и ресурса ее работы.*

**Ключевые слова:** электрическая машина, система токосъема, параметры, оптимизация, потери, ресурс, математическая модель.

К твердощеточным системам токосъема (ТСТ) современных электрических машин (ЭМ), включая и сверхпроводниковые униполярные генераторы, и двигатели для систем электродвижения различных транспортных средств и питания специальной электрофизической и технологической аппаратуры, обычно предъявляются весьма жесткие эксплуатационные и технические требования [1]. К числу важнейших из них следует отнести суммарный ток в системе 100—150 кА, средний или гамма-процентный ресурс системы 5000—8000 ч, скорость скольжения контактных пар 100—150 м/с, падение напряжения в скользящем контакте 0,1—0,2 В, коэффициент трения щеток 0,1—0,25 и расчетную плотность тока в контакте 100—150 А/см<sup>2</sup>.

Расчет технических параметров и показателей надежности работы таких, как правило, уникальных систем традиционным и общепринятым методом [2], основанным на определении необходимого числа щеток  $N_{щ}$  в системе по допустимой плотности тока в них  $j_{щ, доп}$  и использовании среднестатистических значений падения напряжения  $\Delta u$  в скользящем контакте (СК) и интенсивности износа  $\Delta h$  его элементов, просто невозможен, так как не позволяет учитывать изменение конкретных режимов и условий работы ТСТ, а также оптимизировать ее энергетические, габаритные и ресурсные параметры.

Необходимость оптимизации вызвана прежде всего тем, что при увеличении числа щеток  $N_{щ}$  и при усилении нажатия на них  $F_{щ}$  уменьшаются электрические и возрастают механические потери, а суммарные потери, как следствие, минимальны. В то же время соответствующее этому

*The paper describes a methodology for optimizing the energetic, dimensional and durability parameters of multibrush contact systems of electrical machines. The methodology is based on using multifactor multiplicative mathematical models of electrical and mechanical characteristics of a sliding electrical contact. Principles for constructing an algorithm of the vector optimization of the number of brushes in a system and efforts of pressing on them are considered proceed from conditions of insuring the given minimum difference of allowable and calculation values of total losses in a system and its durability.*

**Key words:** electrical machine, brush contact system, losses, durability, optimization, mathematical model

минимуму число щеток должно быть размещено на относительно небольшой рабочей поверхности контактных колец (КК), геометрические размеры которых  $D_k$  и  $b_k$  при номинальной частоте вращения 3000—6000 об/мин существенно ограничены условиями их механической прочности и требованиями к осевым габаритам проектируемой машины в целом, что, в свою очередь, приводит к необходимости резкого сокращения тангенциального  $t$  и радиального  $a$  размеров щеток. Связанное с этим уменьшение расчетной контактной поверхности щетки  $S_{щ} = at$  практически не оказывает влияния на ее электрические и механические характеристики [1], однако изменение боковой поверхности щетки может вызвать недопустимое повышение температуры в области стягивания тока [3] внутри ее объема. Кроме того, оптимальные по минимуму суммарных потерь значения  $N_{щ}$  и  $F_{щ}$  могут не обеспечить требуемых показателей долговечности и безотказности работы системы.

Поэтому разработка принципиально новых методов расчета параметров и прогнозирования надежности работы многощеточных сильноточных ТСТ является весьма важной и актуальной задачей, от решения которой во многом зависит создание электрических машин нового поколения. Краткому изложению методологии решения этой задачи на основе использования многофакторных мультипликативных математических моделей электрических и механических характеристик СК и посвящена настоящая статья.

Под электрическими и механическими характеристиками СК предлагается понимать любые функциональные зависимости падения на-

пряжения в нем  $\Delta u$  и скорости износа его элементов  $\Delta h$  от различных факторов воздействия. К ним, в первую очередь, следует относить ток через щетку  $I_{щ}$ , усилие нажатия на нее  $F_{щ}$  и скорость перемещения скользящих контактных пар  $V_k$ . Кроме того, факторами воздействия, конечно, являются температура, давление и газовый состав окружающей среды, биение и вибрация контактных колец, радиальная и тангенциальная составляющие индукции магнитного поля в зоне токосяема и др. Оценить совместное влияние всех этих факторов на значения  $\Delta u$  и  $\Delta h$  возможно в настоящее время лишь опытным путем с использованием методов теории планирования эксперимента и математического моделирования его результатов.

Определение стохастических связей между  $\Delta u$  ( $\Delta h$ ) и факторами воздействия является эвристической задачей, имеющей бесконечное число решений, поэтому выбор вида математической модели (уравнения регрессии) зависит от анализа исследователем априорной информации, его собственных представлений и пристрастий. Из сопоставления соответствующих разнофакторных полиномиальных (1- и 2-го порядков) и мультипликативных моделей по обусловленности, адекватности, точности, простоте и наглядности следует, что для расчета основных характеристик СК на стадии проектирования ТСТ целесообразно использовать трехфакторные мультипликативные математические модели вида

$$\Delta u \text{ } (\Delta h) = C I_{щ}^{\alpha} F_{щ}^{\beta} V_k^{\gamma},$$

где  $C$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  — постоянные коэффициенты, значения которых определяются маркой щетки и не зависят от ее расчетного сечения  $S_{щ}$ .

Выбор в качестве основных факторов воздействия  $I_{щ}$  и  $F_{щ}$  вместо привычных и общепринятых [2] плотности тока  $j_{щ}$  и давления на щетку  $p_{щ}$  принципиален с физической точки зрения, так как реальная площадь контактирования в сотни и тысячи раз меньше кажущейся (расчетной) площади контакта  $S_{щ}$  [3] и практически не зависит от ее размеров [1]. Действительно, в результате теоретических и экспериментальных исследований было установлено [1], что, например, у турбогенераторных электрографитированных щеток ЭГ2АФ размеры радиусов пятен проводимости ( $a$ -пятен по терминологии Р.Хольма [3]) не превосходят 20–40 мкм, их количество — 20–25 шт., а реальная поверхность контактирования составляет 0,1–0,2 мм<sup>2</sup> и не зависит от  $S_{щ}$  («зеркала» щетки), изменявшейся в опытах от 640 до 100 мм<sup>2</sup>. Причем значения  $\Delta u$  и  $\Delta h$  также не зависят от  $S_{щ}$  при  $I_{щ} = \text{const}$  ( $j_{щ} = \text{var}$ ), а определяются

лишь значением тока через щетку.

Применяя методы теории планирования эксперимента, дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа его результатов, были получены модели указанного выше вида для наиболее характерных контактных пар, используемых в системах токосяема электрических машин, в частности, для электрографитированных и металлографитных щеток ЭГ2АФ, 611ОМ, МГ и МГСО, работающих на стальных, медных и бронзовых контактных кольцах. Некоторые из них для примера представлены в табл. 1 ( $\Delta u$ , В;  $\Delta h$ , мм/1000 ч).

Таблица 1

№	Контактная пара	Вид нарезки рабочей поверхности КК	Мультипликативная математическая модель
1	ЭГ2АФ — нержавеющая сталь	встречно-винтовая	$\Delta u_- = 1,95 I_{щ}^{0,25} F_{щ}^{-0,10} V_k^{0,34}$ $\Delta h_- = 4,17 I_{щ}^{0,31} F_{щ}^{0,71} V_k^{0,62}$
2	ЭГ2АФ — нержавеющая сталь	коллекторно-винтовая	$\Delta u_- = 1,84 I_{щ}^{0,23} F_{щ}^{-0,36} V_k^{0,26}$ $\Delta h_- = 4,62 I_{щ}^{0,41} F_{щ}^{1,0} V_k^{0,82}$
3	611ОМ — нержавеющая сталь	коллекторно-винтовая	$\Delta u_+ = 1,55 I_{щ}^{0,46} F_{щ}^{-0,27} V_k^{0,36}$ $\Delta h_+ = 4,34 I_{щ}^{0,46} F_{щ}^{1,0} V_k^{0,78}$
4	МГСО — Cu + Mg + Cr + Zr	нет	$\Delta h_- = 52 I_{щ}^{1,47} F_{щ}^{0,77} V_k^{2,10}$
5	МГСО — Cu + Mg + Cr	нет	$\Delta u_+ = 0,06 I_{щ}^{0,96} F_{щ}^{-0,70} V_k^{0,04}$ $\Delta h_+ = 125 I_{щ}^{0,72} F_{щ}^{0,50} V_k^{0,80}$
6	МГСО — Cu + Mg + Cr	нет	$\Delta u_- = 0,12 I_{щ}^{0,50} F_{щ}^{-0,14} V_k^{0,10}$ $\Delta h_- = 67 I_{щ}^{1,29} F_{щ}^{0,72} V_k^{1,65}$

В модели табл. 1 факторы воздействия следует подставлять в относительных единицах, принимая за базисные  $I_{щ,б} = 100$  А,  $F_{щ,б} = 10$  Н и  $V_{щ,б} = 50$  м/с. Кроме того, эти модели справедливы, естественно, лишь в определенном диапазоне изменения факторов воздействия:  $I_{щ,б} = 50 \div 500$  А,  $F_{щ,б} = 2 \div 20$  Н и  $V_k = 25 \div 100$  м/с.

Дисперсионный анализ опытных и расчетных данных показал, что разработанные мультипликативные математические модели электрических и механических характеристик СК адекватны результатам опыта с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$  и имеют высокую инженерную точность — средняя погрешность расчета по ним не превосходит 10–12%, что позволяет использовать их для сопоставления эксплуатационных параметров и полярных свойств различных контактных пар в одинаковых режимах и условиях работы ТСТ (в табл. 1, № 4, 6 и № 5, 6), для статистической оценки влияния на эти параметры нерегулируемых факторов, например, вида нарезки рабочей поверхности контактных колец (№ 1, 2),

а также для разработки новых методов расчета многощеточных систем токосъема [1, 4].

Важнейшей задачей при проектировании сильноточных и многощеточных ТСТ является определение числа  $N_{щ}$  и геометрических размеров щеток  $at$ , а также усилий нажатия на них из условий обеспечения задаваемого минимума разности допустимых и расчетных значений суммарных потерь в системе  $p_{\Sigma}$  и ресурса ее работы  $T_p$  ( $\Delta h$ ). Так как  $at$  зависят от  $N_{щ}$ ,  $D_k$  и  $b_k$ , то на стадии проектирования ТСТ следует решать двухкритериальную задачу оптимизации  $N_{щ}$  и  $F_{щ}$  для двух целевых функций  $\varepsilon_p = |p_{\Sigma доп} - p_{\Sigma}|$  и  $\varepsilon_h = |\Delta h_{доп} - \Delta h|$ . Причем область изменения оптимизируемых параметров  $D = |N_{щ} \times F_{щ}|$  ограничена геометрическими размерами  $D_k$  и  $b_k$  рабочей поверхности КК, температурой в области стягивания тока внутри объема щетки и условиями стабильного (без искрения) ее функционирования.

Очевидно, алгоритм однокритериальной (скалярной) оптимизации всего двух параметров  $N_{щ}$  и  $F_{щ}$  должен предусматривать простой пассивный поиск множества локальных минимумов  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_h$  путем сканирования по узлам матриц  $D_p$  и  $D_h$ , заполненных расчетными значениями  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_h$  (или  $p_{\Sigma}$  и  $\Delta h$ ), а алгоритм многокритериальной (векторной) оптимизации необходимо разрабатывать на основе обмена между  $D_p$  и  $D_h$  методом последовательных уступок в задаваемых значениях  $p_{\Sigma доп}$  и  $\Delta h_{доп}$ .

Выбор в качестве целевой функции  $\varepsilon_p$  вместо  $p_{\Sigma}$  обусловлен прежде всего тем, что функция суммарных потерь, приходящихся на одно контактное кольцо, всегда имеет глобальный (абсолютный) минимум вне области изменения параметров оптимизации  $D$ , а условно-частный минимум на ее границе  $F_{щ, min}$ . Кроме того, внутри области  $D$  имеется множество локальных минимумов  $p_{\Sigma, k}$ , которые могут быть получены путем варьирования  $N_{щ, k}$  ( $F_{щ}$ ) при фиксированных значениях  $F_{щ}$  ( $N_{щ, k}$ ). Так, в частности, для щеток 611ОМ, работающих на положительных КК (см. табл. 1, № 3) при  $I_{\Sigma} = 10000$  А, функция суммарных потерь [1]

$$p_{\Sigma, k} = 129 N_{щ, k}^{-0,46} F_{щ}^{-0,27} V_{щ}^{0,36} + 0,1 N_{щ, k} F_{щ} V_k$$

при  $V_k = 1$  (50 м/с) имеет условно-частный минимум  $p_{ку, min} = 20,4$  кВт в точке  $N_{щ, k} = 320$ , лежащей на границе  $D$  ( $F_{щ, min} = 0,2$ ), и, например, локальные минимумы  $p_{F, min} = 23,8$  кВт в точке  $N_{щ, k} = 100$  при  $F_{щ} = 0,6 = \text{const}$  и  $p_{N, min} = 23,7$  кВт в точке  $F_{щ} = 0,5$  при  $N_{щ, k} = 100 = \text{const}$ .

Точку условно-частного минимума нельзя считать оптимальной, так как, во-первых, она принадлежит границе с минимально возможным по условиям стабильного функционирования СК

$F_{щ, min}$ , а во-вторых, и это главное, необходимость в размещении на КК характерного для этой точки весьма большого числа щеток может привести к недопустимому повышению температуры  $\theta_c$  в теле щетки из-за резкого уменьшения ее боковой поверхности охлаждения.

В точках локальных минимумов с рациональными по условиям стабильного контактирования значениями  $F_{щ} = 0,5 \div 0,8$  ( $5 \div 8$  Н) число щеток в несколько раз меньше, чем в точке условно-частного минимума, а  $p_{F, min}$  или  $p_{N, min}$  всего лишь на 10–15% выше  $p_{ку, min}$ , что, естественно, приводит к резкому уменьшению тепловой напряженности СК. Если в этих точках  $\Delta h < \Delta h_{доп}$  и  $\Delta \theta_c < \Delta \theta_{с, доп}$ , то процесс поисковой оптимизации можно считать завершенным. В противном случае необходимо сделать уступку в значении  $p_{\Sigma доп}$  и продолжить итерационный процесс сначала в направлении увеличения  $N_{щ, k}$  (уменьшения электрической составляющей  $\Delta h$ ), а затем, если потребуется, и снижения  $F_{щ}$  (уменьшения механической составляющей  $\Delta h$ ) при постоянном контроле  $\Delta \theta_c$ . Если необходимое значение  $\Delta h$  все же не удастся получить, то нужно, сделав уступку в значении  $\Delta h_{доп}$ , продолжить поиск в обратном направлении. Выбор нового значения  $\Delta h_{доп}$  следует, конечно, проводить с учетом необходимости обеспечения требуемых количественных показателей надежности работы системы [5].

Принципиально важным элементом структуры рассматриваемого алгоритма векторной оптимизации является блок контроля тепловой напряженности СК, для оценки которой предлагается упрощенная тепловая схема замещения, представленная на рис. 1. Схема разработана на основе анализа двух- и трехмерных картин электрического и теплового полей в теле щетки, найденных аналитическими и численными методами. Ее характерной особенностью является разделение точек подвода тепловых потоков  $Q_{мех}$  и  $Q_{эл}$ , учитывающее, что с поверхности щеток отводится, как показали соответствующие эксперименты и расчеты, до 15%  $Q_{эл}$  и до 5%  $Q_{мех}$ . С физической точки зрения это объясняется тем, что  $p_{щ, мех}$  выделяются непосредственно в зоне скольжения элементов контактной пары, а  $p_{щ, эл}$  — в сопротивлении стягивания (зоне стягивания) линий тока в щетке.

В качестве инженерного критерия оценки теп-

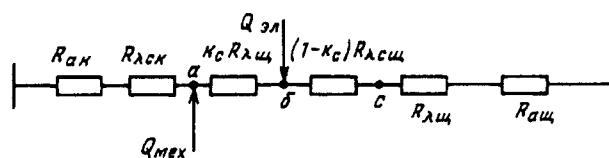


Рис. 1. Тепловая схема замещения СК



обходимо, естественно, повысить интенсивность охлаждения поверхности щетки, применив, например, водяное охлаждение щеткодержателя.

**Выводы.** 1. Основными факторами воздействия, определяющими падение напряжения  $\Delta u$  в скользящем электрическом контакте и интенсивность износа его элементов  $\Delta h$ , следует считать ток через щетку  $I_{щ}$ , усилие нажатия на нее  $F_{щ}$  и скорость перемещения контактных пар  $V_k$ .

2. Для сопоставления эксплуатационных параметров различных контактных пар и статистической оценки влияния на их электрические и механические характеристики нерегулируемых факторов, а также для разработки принципиально новых методов расчета многощеточных систем токосъема целесообразно использовать трехфакторные мультипликативные математические модели  $\Delta u$  и  $\Delta h$ .

3. На стадии проектирования ТСТ достаточно решать векторную задачу оптимизации  $N_{щ}$  и  $F_{щ}$  для двух целевых функций  $\varepsilon_p = |p_{\Sigma \text{доп}} - p_{\Sigma}|$  и  $\varepsilon_h = |\Delta h_{\text{доп}} - \Delta h|$  с учетом того, что матрица изменения  $N_{щ}$  и  $F_{щ}$  ограничена геометрическими размерами  $D_k$  и  $b_k$  рабочей поверхности КК, температурой в области стягивания тока внутри объема щетки и условиями стабильного (без искрения) ее функционирования.

4. За критерий оценки тепловой напряженности щетки предлагается принимать значение температуры в теле щетки за зоной стягивания тока  $\theta_c$  (за тепловым сопротивлением стягивания  $R_{\lambda \text{щ}}$ ), так как температура поверхности щетки или поверхности контактных колец не имеет диагностического значения.

5. Опыт проектирования многощеточных систем токосъема с  $I_{\Sigma} = 10, 23, 37, 87$  и  $110$  кА для машин различного назначения показал, что компьютерная технология реализации разработанного алгоритма векторной оптимизации  $N_{щ,k}$  и  $F_{щ}$ , адаптированная к САПР ЭМ, позволяет эффективно и с минимальными затратами времени находить матрицу рациональных значений энергетических, габаритных и ресурсных параметров ТСТ с учетом множественности конкретных режимов и условий их эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забон В.Н., Попов В.В., Федосов М.И. Научно-технические основы проектирования и создания сверхпроводниковых униполярных электрических машин для систем электродвижения судов. — Научно-технические ведомости СПбГТУ, 1996, № 2.
2. Лифшиц П.С. Справочник по щеткам электрических машин. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Хольм Р. Электрические контакты. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961.
4. Демкин П.С., Забон В.Н. Прогнозирование технического состояния и надежности систем токосъема электродвигателей машин. — Научно-технические ведомости СПбГТУ, 1997, № 4.

[24.09.98]

*Автор: Забон Валерий Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1967 г. В 1978 г. защитил в ЛПИ кандидатскую диссертацию на тему «Исследование работы двигателей постоянного тока в установившихся и переходных режимах при тиристорном питании». Профессор кафедры «Электрические машины» СПбГТУ.*

#### К сведению авторов и читателей!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей. Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала (Б. Черкасский пер., 2/10, тел. 924-24-80).

# Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными диэлектриками

КУЧИНСКИЙ Г.С., ГАЛАХОВА Л.Н.

В результате исследования основных электрофизических характеристик экологически безопасных жидких диэлектриков установлены наиболее рациональные жидкости для пропитки изоляции силовых конденсаторов. На основании исследования характеристик частичных разрядов и ресурсных испытаний определены допустимые рабочие напряженности. Полученные результаты исследований использованы для разработки отечественных силовых конденсаторов с пропиткой экологически безопасными жидкостями.

Ключевые слова: силовые конденсаторы, жидкие диэлектрики, экологическая безопасность, рабочие напряженности, расчет

Выпускаемые до 1980 г. силовые конденсаторы для компенсации реактивной мощности в электроустановках выполнялись с бумажно-плёночной изоляцией, пропитанной трихлордифенилом, и благодаря повышенной стабильности трихлордифенила в электрическом поле имели весьма высокие удельные характеристики. Однако вследствие экологической опасности трихлордифенила возникла необходимость его замены на другие диэлектрические пропитывающие жидкости. В настоящей работе исследовались следующие экологически безопасные заменители трихлордифенила: фенилксиллэтан японского производства ( $\epsilon/\epsilon_0=2,65$ ), жарилек С101 (монодибензилтолуол,  $\epsilon/\epsilon_0=2,65$ ) и миксофлекс 1000 (диоктилфталат,  $\epsilon/\epsilon_0=5,3$ ) французского производства, отечественной ДОН-3 (монодибензилтолуол,  $\epsilon/\epsilon_0=2,64$ ).

Исследование стабильности этих жидкостей позволило установить следующее. По повышению термической стабильности пропитывающие жидкости располагаются в следующем порядке: миксофлекс 1000 (наименьшая стабильность), ДОН-3, фенилксиллэтан, жарилек С101; в условиях одновременного воздействия электрического поля и температуры жарилек С101 также имеет большую стабильность по сравнению с другими жидкостями. Жидкости ДОН-3, фенилксиллэтан, жарилек С101 являются наиболее газостойкими в электрическом поле; более низкой газостойкостью обладает миксофлекс 1000.

Исследования бумажно-плёночного и плёночного диэлектриков проводились с использованием полипропиленовой пленки. Кратковременная электрическая прочность исследовалась на

On the basis an investigation of main electrophysical characteristics of ecology safe liquid dielectrics the most efficient liquids for impregnating power capacitors are determined. On the basis the investigation of characteristics of partial discharges and service life tests the allowable operating strengths are determined. The results of investigations have been used for designing home power capacitors impregnated with ecology safe liquids.

Key words: power capacitors, liquid dielectrics, ecology safety, operating strengths, calculation

секциях конденсаторов с большой площадью электродов (алюминиевой фольги), равной  $2,5 \text{ м}^2$ . Толщина диэлектрика при этом изменялась от 16 до 60 мкм. Результаты исследования бумажно-плёночной и плёночной изоляции показали, что наибольшей прочностью обладает плёночный диэлектрик с пропиткой фенилксиллэтаном. При толщине диэлектрика  $d_c = 30 \text{ мкм}$  среднее значение пробивной напряженности  $E_{\text{пр.ср}} = 245 \text{ кВ/мм}$  при весьма малом разбросе значений — коэффициент вариации  $\sigma^* = 2,4\%$ . Преимущество плёночного диэлектрика по сравнению с бумажно-плёночным и особенно бумажным реализуется наиболее ощутимо при малых толщинах ( $20 \div 30 \text{ мкм}$ ), см. рис. 1.

Исследования механизма разрушения конденсаторной изоляции, пропитанной жидким диэлектриком, выявили следующее: анализ ИК-спектров отечественной и зарубежной полипропиленовой пленки показал, что обе пленки имеют идентичную химическую и молекулярную структуры и сопоставимую кратковременную элект-

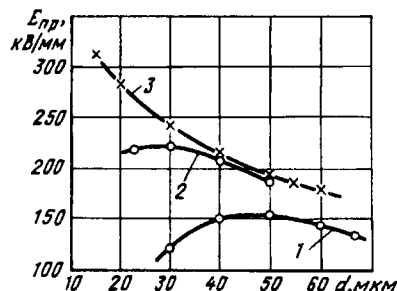


Рис. 1. Зависимость пробивной напряженности от толщины изоляции секций, площадь электродов  $2500 \text{ см}^2$ : 1 — конденсаторная бумага; 2 — бумажно-полипропиленовая изоляция, 67% пленки; 3 — полипропиленовая изоляция (пропитка фенилксиллэтаном)

рическую прочность при испытании в воздушной среде. Кратковременная электрическая прочность полипропиленовых пленок снижается с увеличением времени контактирования с пропитывающей жидкостью; взаимодействие жидкости с пленкой в процессе термостарения приводит к увеличению диэлектрических потерь пропитывающей жидкости. Пленка французской фирмы Боллоре практически не влияет на диэлектрические потери пропитывающего состава. В то же время влияние отечественной и финской пленок существенно: увеличение диэлектрических потерь пропитывающей жидкости фенилксиллэтана из конденсаторов в процессе ресурсных испытаний тем значительнее, чем выше значение испытательной напряженности электрического поля в диэлектрике конденсатора.

Основным фактором, определяющим увеличение диэлектрических потерь пропитывающей жидкости, является электропроводность, что подтверждается линейным характером зависимости  $\ln \operatorname{tg} \delta = f(1/T)$  в исследованном диапазоне температур. Хроматографический анализ фенилксиллэтана, взятого из конденсаторов, прошедших различную длительность ресурсных испытаний, показал рост концентрации водорода по мере старения изоляции. Этот рост свидетельствует о происходящих процессах разложения молекул жидкого диэлектрика — разрывах связей С—Н и образовании газообразных продуктов.

Анализ результатов показывает их противоречивость. С одной стороны, не было выявлено влияния напряженности электрического поля на процессы старения. С другой стороны, отмечается существенное влияние напряженности электрического поля на тангенс угла диэлектрических потерь пропитывающей жидкости, взятой из конденсаторов в процессе ресурсных испытаний, которые проводились при напряженностях  $40 \div 50$  кВ/мм. При этих напряженностях не были зарегистрированы частичные разряды (ЧР) на уровне  $10^{-12}$  Кл. Можно было предположить, что процессы старения при  $E = 40 \div 50$  кВ/мм происходят вследствие ЧР значительно меньшей интенсивности на уровне  $10^{-14} \div 10^{-13}$  Кл.

Исследования характеристик ЧР показали, что наибольшие значения критических ЧР имеет пленочный диэлектрик с пропиткой фенилксиллэтано. Зависимости напряженности критических ЧР от толщины диэлектрика (в миллиметрах) имеют вид

$$E_{кр} = A d^{-0,58} \text{ кВ/мм}, \quad (1)$$

где коэффициент  $A$  равен: для бумажного диэлектрика с пропиткой трихлордифенилом — 11; с пропиткой миксофлексом — 8,0; для бумажно-пленочного диэлектрика с пропиткой мик-

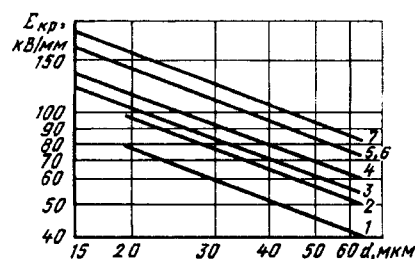


Рис. 2. Зависимость напряженности критических ЧР от толщины изоляции секций. Бумажный диэлектрик, пропитка миксофлексом (1), трихлордифенилом (2); бумажно-пленочный диэлектрик, пропитка миксофлексом 1000 (3); трихлордифенилом (4); фенилксиллэтано (5). Пленочный диэлектрик, пропитка фенилксиллэтано, незагнутые края обкладок (6); то же, загнутые края обкладок (7)

софлексом 1000 — 10,2, трихлордифенилом — 11,9, фенилксиллэтано — 14,9; для пленочной изоляции с пропиткой фенилксиллэтано с незагнутыми краями обкладок — 14,9, с загнутыми краями обкладок — 16,4. Полученные зависимости изображены на рис. 2.

Для выявления возможности развития процессов старения при напряженностях, близких к рабочим вследствие частичных разрядов на уровне  $10^{-14} \div 10^{-13}$  Кл, были поставлены специальные исследования с их регистрацией с помощью фотоэлектронного умножителя. Эти исследования показали, что на рабочем напряжении в изоляции силовых конденсаторов отсутствуют ЧР на уровне  $10^{-12}$  Кл, т.е. отсутствуют ЧР, регистрируемые с помощью обычной электрической схемы регистрации. В то же время в конденсаторах может иметь место старение изоляции под воздействием слабых ЧР на уровне  $10^{-14}$  Кл. Исследования проводились на образцах конденсаторной изоляции малой емкости и на моделях секций\*. Была исследована изоляция на основе конденсаторной бумаги, пропитанной конденсаторным маслом, и полипропиленовой пленки, пропитанной заменителями трихлордифенила.

Исследования показали, что напряжение начальных ЧР на уровне  $10^{-13}$  Кл определяется в основном диэлектрической проницаемостью изоляции, которая зависит от диэлектрической проницаемости пропитывающего состава. При этом с увеличением диэлектрической проницаемости наблюдается рост напряжения начальных частичных разрядов  $U_n$ . Зависимость напряженности начальных частичных разрядов  $E_n$ , кВ/мм, от толщины диэлектрика, мм, при плавном подъеме напряжения может быть представлена формулой

\* Кучинский Г.С., Пильщиков В.Е., Чуракова Н.А., Галахова Л.Н. Характеристики частичных разрядов в силовых конденсаторах промышленной частоты с пленочной полипропиленовой изоляцией, пропитанной экологически безопасными жидкими диэлектриками. — Высоковольтная электроэнергетика и электрофизика. Тр. ЛГТУ, 1991, № 439.

$$E_n = Ad^{-0,5}, \quad (2)$$

где значения коэффициента  $A$  приведены ниже:

Тип изоляции	Пропитка	$A$
Конденсаторная бумага	Нефтяное масло	3,6
Полипропиленовая пленка	Нефтяное масло	4,9
Полипропиленовая пленка	Фенилксилэтан	5,2
Полипропиленовая пленка	Миксофлекс 1000	7,1

При исследовании зависимости  $E_n$  от толщины диэлектрика установлено, что значения напряженности начальных ЧР в пропитанной пленочной изоляции имеют большой статистический разброс, значительно превышающий разброс этих значений для бумажной изоляции, пропитанной конденсаторным маслом. Установлено также, что в процессе выдержки под напряжением в пленочной изоляции с пропиткой газостойкими жидкостями происходит сильное затухание ЧР: уменьшаются кажущийся разряд ЧР и число ЧР в секунду.

Предварительное воздействие переменного напряжения на пропитанную пленочную изоляцию в 1,5—2 раза превышает напряженность начальных ЧР  $E_n$ . Напряжение начальных ЧР повышается, если край фольги загнут; однако после выдержки под напряжением эффекта от применения загнутого края фольги практически не наблюдается.

В связи с особенностью развития ЧР в пленочной изоляции были проведены опыты по исследованию тока ЧР  $I_{чр}$  при ступенчатом подъеме напряжения с выдержкой на каждой ступени по 30 мин. Подъем напряжения производился до возникновения критических ЧР. Были построены обобщающие кривые тока  $I_{чр}$  и кажущегося заряда  $q_{чр}$  от напряженности  $E$  по наибольшим значениям для каждой ступени в конце выдержки. Характер зависимостей, полученных с помощью электрической схемы регистрации и при регистрации с помощью ФЭУ, для  $q_{чр}$  приведен на рис. 3. Подобные зависимости имеют место для

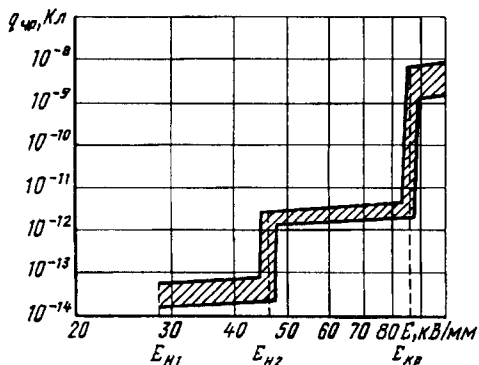


Рис. 3. Характер зависимости кажущегося заряда  $q_{чр}$  от напряженности  $E$ ,  $d = 45$  мкм, полипропиленовая пленка, пропитка фенилксилэтаном

изоляции, пропитанной газостойкими жидкостями. Для них наблюдаются два уровня (две ступени) резкого повышения кажущегося заряда  $q_{чр}$  и тока  $I_{чр}$  ЧР: первая ступень — до уровня  $q_{чр} = 10^{-12}$  Кл, вторая — до уровня  $q_{чр} = 10^{-9} \div 10^{-8}$  Кл и выше. Напряженность второй ступени соответствует напряженности критических ЧР, полученных на секциях конденсаторов с помощью электрической схемы регистрации при чувствительности на уровне  $(2 \div 5)10^{-11}$  Кл.

Значительный объем исследований был посвящен длительной электрической прочности конденсаторной изоляции на основе ресурсных испытаний конденсаторов; длительным испытаниям подвергались реальные конденсаторы, изготовленные с изоляцией из конденсаторной бумаги, с пропиткой миксофлексом 1000, бумажно-пленочные конденсаторы с пропиткой фенилксилэтаном, жидкостями ДОН-3 и жарилек С101.

В связи с тем, что в процессе длительных испытаний при различных напряженностях электрического поля в конденсаторах устанавливалась разная температура, результаты испытаний приводились к одинаковой температуре. Пересчет наработок от одной температуры в наиболее нагретой точке конденсатора к другой производился по формуле

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \exp \left[ B_T \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (3)$$

или

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \exp [\alpha_T (t_1 - t_2)], \quad (4)$$

где  $\tau_1$  — наработка конденсатора при температуре  $T_1$  (или  $t_1$ );  $\tau_2$  — наработка конденсатора при температуре  $T_2$  (или  $t_2$ );  $T_1$  и  $T_2$  — температура в изоляции секций конденсатора, К;  $t_1$  и  $t_2$  — то же, °С;  $B_T = W_a / (kT)$ ;  $W_a$  — энергия активации;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\alpha_T$  — температурный коэффициент, при котором в определенном диапазоне температур результаты расчетов по формулам (3) и (4) практически совпадают.

Испытуемые конденсаторы разбивались на группы, и каждая группа испытывалась на своем уровне испытательного напряжения. Уровень испытательного напряжения выбирался так, чтобы испытательная напряженность изоляции секций конденсатора не превышала напряженности критических ЧР, а температура изоляции не превышала предельно допустимой величины. В результате испытаний определялось время работы конденсатора до отказа. За отказ принимался пробой одной из секций конденсатора. По результатам испытаний для каждого типа конденсатора и для каждой испытательной напряжен-

ности строились функции распределения ресурса (время наработки до отказа) испытуемых конденсаторов.

Как показали результаты испытаний, функции распределения ресурса хорошо соответствуют вейбулловскому закону распределения

$$F(\tau) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\tau}{\tau_{0,63}} \right)^\alpha \right], \quad (5)$$

где  $\tau_{0,63}$  — ресурс, соответствующий вероятности  $F(\tau)=0,63$ ;  $\alpha$  — параметр разброса.

При этом пересчет наработок от одного режима испытания при напряженности  $E_1$  и температуре изоляции  $T_1$  к другому режиму при напряженности  $E_2$  и температуре изоляции  $T_2$  может быть произведен по формуле

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^n \exp \left[ B_T \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (6)$$

или

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^n \exp [\alpha_T (t_1 - t_2)], \quad (7)$$

где  $\tau_1$  — наработка конденсатора при напряженности  $E_1$  и температуре  $T_1$ ;  $\tau_2$  — наработка конденсатора при испытательной напряженности  $E_2$  и температуре  $T_2$ ;  $n$  — показатель степени, который определяется по результатам ресурсных испытаний.

Результаты определения параметра  $\alpha$  для полученных экспериментальных функций распределения ресурса испытанных конденсаторов приведены в таблице. В качестве примера на рис. 4 приведены функции распределения ресурса бумажно-плёночных конденсаторов с пропиткой жарилек С101, построенные в вейбулловской системе координат.

Значения параметров разброса  $\alpha$  в вейбулловской функции распределения [см. формулу (5)] и показателя степени  $n$  [см. формулы (6), (7)]

Тип изоляции	Испытательная напряженность, кВ/мм		Параметр разброса		Показатель степени $n$
	$E_1$	$E_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	
Бумажная с пропиткой миксофлексом	33,0	27,0	3,1	2,9	12
Бумажно-плёночная с пропиткой фенилксилитаном	68,0	63,0	2,8	2,7	11
Бумажно-плёночная с пропиткой ДОН-3	70,0	61,5	1,6	1,7	14,5
Бумажно-плёночная с пропиткой жарилек С101	63,0	57,5	1,25	1,3	16,5

Из полученных результатов ускоренных испытаний конденсаторов были определены значения показателя степени  $n$  в формулах (6), (7) для зависимости ресурса от напряженности

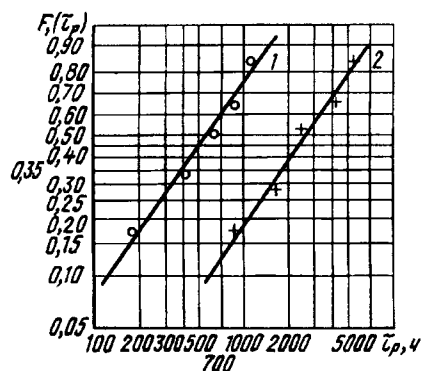


Рис. 4. Функции распределения ресурса бумажно-плёночных конденсаторов с пропиткой жарилек С101. Толщина диэлектрика 35 мкм, испытательная напряженность: 1 — 63 кВ/мм; 2 — 49 кВ/мм

электрического поля. Значения  $n$  для конденсаторов с различными типами изоляции также приведены в таблице.

Из приведенной таблицы следует, что параметры разброса для каждого типа изоляции слабо изменяются при изменении испытательной напряженности электрического поля. Наибольший разброс ресурса имеет место для бумажно-плёночной изоляции, пропитанной жарилек С101. Несколько меньший, но тоже значительный разброс ресурса возникает у конденсаторов с пропиткой ДОН-3. Наименьший разброс имеет место у конденсаторов с бумажно-плёночной изоляцией с пропиткой фенилксилитаном и у бумажных с пропиткой миксофлексом 1000. Очевидно, что для уменьшения разброса ресурса необходимо совершенствовать технологию изготовления конденсаторов с пропиткой жидкостями ДОН-3 и жарилек С101.

Как следует из этой же таблицы, для бумажно-плёночной изоляции наибольшее значение показателя степени  $n$ , т.е. наиболее сильная зависимость ресурса от напряженности электрического поля, имеет место для изоляции, пропитанной жидкостями ДОН-3 и жарилек С101. Этот приводит к тому, что, несмотря на больший статистический разброс ресурса испытуемых конденсаторов, допустимые рабочие напряженности при заданном ресурсе и надежности оказываются наибольшими для жидкостей ДОН-3 и жарилек С101.

На основании результатов исследований кратковременной электрической прочности, характеристик ЧР на уровне  $10^{-12}$  Кл, а также на уровне  $10^{-14} \div 10^{-13}$  Кл и по результатам ресурсных испытаний были определены допустимые рабочие напряженности  $E_{\text{раб}}$  в изоляции конденсаторов промышленной частоты с пропиткой экологически безопасными заменителями трихлордифенила. При этом были учтены следующие требования к изоляции секций:

иметь достаточную кратковременную электрическую прочность (пробивную напряженность) при воздействии перенапряжений, возникающих на конденсаторе в процессе эксплуатации;

иметь установленный ресурс при заданной надежности при длительном воздействии рабочего напряжения;

выдерживать без ухудшения изоляционных свойств установленное испытательное напряжение;

потери в конденсаторе не должны превосходить определенного значения, при котором обеспечивается достаточный отвод тепла и температура наиболее нагретой области конденсатора не превышает допустимых значений.

При этом был учтен опыт создания и эксплуатации конденсаторов данного типа.

Для удовлетворения приведенных выше требований при выборе допустимых рабочих напряженностей  $E_{\text{раб}}$  по характеристикам ЧР целесообразно исходить из следующих соображений;

1) при испытательном напряжении  $U_{\text{исп}} = 2,15U_{\text{ном}}$  не должны возникать критические ЧР:

$$E_{\text{раб}} < E_{\text{кр}}/2,15; \quad (8)$$

2) значение рабочей напряженности должно быть меньше первого резкого возрастания тока ЧР на уровне  $10^{-12}$  Кл, т.е. напряженности ЧР второго рода  $E_{\text{н2}}$ :

$$E_{\text{раб}} \leq E_{\text{н2}}. \quad (9)$$

С учетом перечисленных выше соображений были установлены допустимые рабочие напряженности  $E_{\text{раб}}$ , которые были определены из расчета ресурса конденсатора 20 лет при вероятности безотказной работы 0,9. При этом зависимости допустимых рабочих напряженностей  $E_{\text{раб}}$  от толщины, мм, имеют вид:

$$E_{\text{раб}} = Ad^{-0,5}, \text{ кВ/мм}, \quad (10)$$

где коэффициент  $A$  для пленочной изоляции равен: при пропитке конденсаторным маслом — 6,1, миксофлексом 1000 — 7,4, фенилксилэтаном — 8,9; для бумажно-пленочной изоляции (67% пленки) при пропитке миксофлексом 1000 — 5,1, фенилксилэтаном — 7,2, жарилек С101 и ДОН-3 — 7,7.

Эти зависимости для изоляции из полипропиленовой пленки изображены на рис. 5, а, а для бумажно-пленочной изоляции — на рис. 5, б. Полученные зависимости приводят к следующим значениям допустимых рабочих напряженностей для некоторых конкретных частных случаев: для бумажной изоляции с пропиткой миксофлексом 1000 при толщине  $d=68$  мкм —

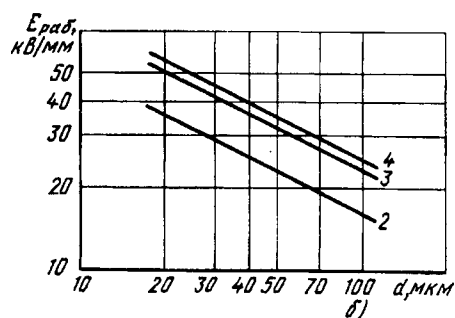
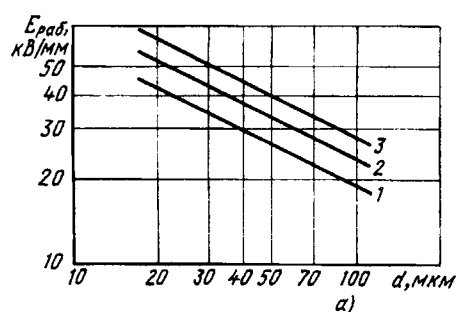


Рис. 5. Зависимости допустимой рабочей напряженности  $E_{\text{раб}}$  от толщины изоляции из полипропиленовой пленки (а) и для бумажно-пленочной изоляции (б). Пропитка: 1 — конденсаторным маслом; 2 — миксофлексом 1000; 3 — фенилксилэтаном; 4 — жарилек С101 или ДОН-3

$E_{\text{раб}} = 19,5$  кВ/мм; для бумажно-пленочной изоляции с пропиткой фенилксилэтаном при  $d=30 \div 35$  мкм —  $E_{\text{раб}} = 40 \div 42$  кВ/мм, с пропиткой ДОН-3 или жарилек С101 —  $E_{\text{раб}} = 43 \div 45$  кВ/мм; для пленочного диэлектрика на основе полипропиленовой пленки с пропиткой фенилксилэтаном при  $d=30 \div 35$  мкм значение  $E_{\text{раб}} = 49 \div 51$  кВ/мм.

По результатам исследования наиболее рациональной пропитывающей жидкостью для бумажно-пленочных конденсаторов на напряжения до 1 кВ является миксофлекс 1000, для бумажно-пленочных и пленочных конденсаторов на напряжения 1 кВ и выше целесообразно применять фенилксилэтан, жарилек С101 или ДОН-3.

На основе полученных данных были разработаны бумажно-пленочные конденсаторы с пропиткой экологически безопасными жидкостями, которые имеют удельные характеристики на уровне лучших зарубежных аналогов. Конденсаторы испытаны на соответствие действующей нормативно-технической документации. Изготовление разработанных конденсаторов внедрено на конденсаторных заводах России и Казахстана.

**Выводы.** 1. По повышению термической стабильности пропитывающие жидкости располагаются в следующем порядке: миксофлекс 1000 (наименьшая стабильность), ДОН-3, фенилксилэтан, жарилек С101; в условиях одновремен-

ного воздействия электрического поля и температуры жарилек С101 более стабилен по сравнению с фенилксилилэтаном. Жидкости ДОН-3, фенилксилилэтан, жарилек С101 оцениваются как наиболее газостойкие; низкой газостойкостью обладает миксофлекс 1000.

2. Наибольшие значения напряженности критических ЧР имеет пленочный (полипропиленовый) диэлектрик с пропиткой фенилксилилэтаном. В процессе выдержки под напряжением в пленочной изоляции происходит сильное затухание ЧР.

3. При ЧР на уровне  $10^{-14} \div 10^{-13}$  Кл для изоляции, пропитанной газостойкими жидкими диэлектриками, наблюдаются два уровня (две ступени) резкого повышения кажущегося заряда и тока ЧР: первая ступень — уровня  $q_{\text{чр}} = 10^{-12}$  Кл, вторая — до  $q_{\text{чр}} = 10^{-9} \div 10^{-8}$  Кл и выше. Напряженность второй ступени соответствует напряженности критических ЧР.

4. В процессе ресурсных испытаний снижается кратковременная электрическая прочность пленок, в том числе за счет контактирования с пропитывающей жидкостью. Для некоторых типов полипропиленовой пленки это приводит к увеличению  $\text{tg } \delta$  пропитывающей жидкости.

5. Наиболее рациональной пропитывающей жидкостью для бумажно-пленочных конденсаторов на напряжение до 1 кВ является миксофлекс 1000, для бумажно-пленочных и пленочных конденсаторов на напряжения 1 кВ и выше целесообразно применять фенилксилилэтан, жарилек С101 или ДОН-3.

6. По результатам исследования характеристик

ЧР и ресурсных испытаний определены допустимые рабочие напряженности в изоляции секций конденсаторов с пропиткой экологически безопасными жидкостями. Разработанные на основании полученных данных бумажно-пленочные конденсаторы имеют удельные характеристики на уровне лучших зарубежных аналогов.

[24.09.98]

*Автор: Кучинский Георгий Станиславович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ), ныне Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ) в 1947 г. В 1965 г. защитил докторскую диссертацию в ЛПИ на тему «Частичные разряды и срок службы высоковольтной бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа». Профессор кафедры «Инженерная электрофизика и техника высоких напряжений» СПбГТУ.*

*Галахова Людмила Тимофеевна окончила факультет радиоэлектроники и автоматики Московского института нефтехимической и газовой промышленности (ныне Академии нефтехимической и газовой промышленности) им. Губкина в 1965 г. В 1996 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Электрофизические характеристики изоляции силовых конденсаторов промышленной частоты с пропиткой экологически безопасными жидкостями». Ведущий инженер компании «Объединенная энергия», Москва.*

### Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие биографические сведения об авторах. В связи с этим просим всех авторов при направлении статьи в редакцию сообщить следующие сведения:

1. Полные имена и отчества всех авторов
2. Какой факультет, какого вуза и когда закончил
3. Когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита
4. Место настоящей работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4—5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

# Исследование старения электроизоляционных материалов силовых кабелей и конденсаторов

АНДРЕЕВ А.М., КАНИСКИН В.А., ПОЛОНСКИЙ Ю.А.

*Представлены результаты экспериментальных исследований, связанных со старением электроизоляционных материалов в силовых кабелях и конденсаторах. Проанализировано влияние жидкой фазы, находящейся в контакте с материалом, на процессе старения.*

**Ключевые слова:** кабель, конденсатор, электроизоляционный материал, электрическое поле, старение, исследование

**Введение.** Проблема старения электроизоляционных материалов (ЭИМ), используемых при изготовлении силовых кабельных и конденсаторных изделий, имеет важное практическое значение, так как эти изделия предназначены для многолетней эксплуатации и преждевременный выход их из строя ведет к серьезным негативным последствиям. Процессы, обуславливающие старение ЭИМ указанных электротехнических изделий, связаны, в частности, с влиянием жидкой фазы, находящейся в контакте с твердым ЭИМ. Источники жидкой фазы и их влияние для силовых кабелей и конденсаторов различны: для кабелей — это вода, проникающая в изоляцию под действием электрического поля в процессе эксплуатации из окружающей среды, в виде водных триингов; для конденсаторов — это искусственно вводимые электроизоляционные кремнийорганические жидкости. При этом наблюдаемый эффект различен — в первом случае имеет место интенсификация процессов старения, во втором, наоборот, замедление. Это связано как с составом жидкой фазы, так и с физико-химическими процессами, происходящими между твердым диэлектриком и жидкостью в условиях воздействия электрического поля повышенной напряженности. Настоящая статья посвящена изучению указанных процессов старения.

**Кабельная техника.** В кабельной технике в настоящее время широкое применение находят полимеры: поливинилхлорид, полиэтилен (ПЭ), фторопласты. Наибольшее применение находят ПЭ и композиции на его основе. В распределительных сетях энергосистем эксплуатируется большое количество кабелей с полимерной изоляцией и оболочкой. Они имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с кабелями с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой: по массогабаритным, электрическим и физико-механическим свойствам, технологии изготовления,

*Results of experimental investigations concerning ageing of electrical insulating materials in power cables and capacitors are presented. The influence of a liquid phase contacting with a material on the ageing process has been analysed.*

**Key words:** cable, capacitor, electrical insulating, electrical field, ageing, investigation

прокладке, монтажу и эксплуатации. По сравнению с маслonaполненными кабелями они имеют дополнительные преимущества: отсутствие пропитки и соответственно всей масляной аппаратуры.

Однако в процессе эксплуатации кабели с полимерной изоляцией часто выходят из строя значительно раньше гарантированного срока службы. Это связано с возникновением и развитием в полимерной изоляции под действием электрического поля системы тонких цилиндрических микроканалов диаметром 0,1—1,0 мкм в виде «кустов» или ветвистых побегов (триингов), каналы которых заполнены воздухом (газом) — электрические триинги (ЭТ), или заполнены водой — водные триинги (ВТ). Электрические триинги легко выявляются по частичным разрядам (ЧР), которые происходят в газообразной среде каналов. Электрические триинги известны давно, их изучение привело к установлению многих закономерностей их зарождения и развития.

Проблема ВТ возникла в 80-е годы из-за частого выхода из строя кабелей в эксплуатации, особенно за рубежом, где полимерная изоляция практически вытеснила бумажную изоляцию с вязкой пропиткой. Водные триинги трудно обнаружить: они прозрачны, ЧР отсутствуют, их зарождение и рост происходит при напряженностях поля, более низких, чем для ЭТ.

Исследования ВТ проведены на ПЭ композициях: ПЭ 102-01К, ПЭ 107-01К, ПЭ 153-01К, ПЭ 178-01К, ПЭНД, СЭВИЛЕН 115, сшитые ПЭ композиции (СПЭ) и др. Для создания контролируемого местоположения и ускоренного развития ВТ на поверхности образцов стальными иглами с радиусом закругления 2,5; 3,8; 5,0; 6,2 и 25 мкм наносили искусственные углубления, которые моделировали заусенцы и риски на жиле, поры и неоднородности, реально существующие в ПЭ изоляции кабелей. Заточку острия игл проводили электрохимическим трав-

лением. Наличие в грунтовых водах, окружающих кабели в реальных условиях эксплуатации, водных растворов солей увеличивает скорость роста ВТ, что привело к необходимости исследования влияния на ВТ водных растворов различных солей.

В процессе развития ВТ можно выделить несколько стадий, которые развиваются последовательно друг за другом, но их закономерности существенно различаются: 1) увлажнение изоляции; 2) зарождение ВТ; 3) рост ВТ; 4) резкое ухудшение электрических свойств и пробой изоляции. Последняя стадия наиболее скоротечна, так как является предпробивной, поэтому основное внимание уделяется первым трем стадиям [1].

Сорбция влаги полимерами происходит за счет активированной диффузии и характеризуется коэффициентами диффузии, влагопроницаемости и растворимости воды в ЭИМ [2, 3]. Исследования показали, что электрическое поле, особенно неоднородное переменное, оказывает существенное влияние на увлажнение полимеров. Подробно механизм влияния электрического поля рассмотрен в [1]. Дальнейшие исследования показали, что коэффициент диффузии молекул воды в полимерах в неоднородном переменном поле увеличивается на два порядка [4].

В полимерной изоляции с локально накопленной влагой (у жилы, во включениях, порах) под действием электрического поля происходит зарождение и развитие ВТ. Оценка сил электрического поля, приложенных на поверхности раздела вода—полимер, показала, что со стороны воды на полимер в неоднородном поле воздействуют большие давления, динамический же характер их приложения при переменном напряжении приводит к значительным механическим напряжениям. Они приводят к возникновению микротрещин, которые заполняются водой, т.е. зарождается ВТ, а поверхность раздела вода—полимер передвигается вглубь полимера, т.е. ВТ растет [1].

В результате исследований и анализа экспериментальных данных установлено [5], что наиболее чувствительными и значимыми характеристиками ВТ, по которым можно судить о стойкости полимерной изоляции к ВТ, являются два параметра: время до зарождения ВТ в полимере  $\tau_3$  и скорость его роста  $V = dL/d\tau_p$ , где  $L$  — длина ВТ;  $\tau_p$  — время роста ВТ. Экспериментально установлено, что эти параметры хорошо отражают изменения в структуре полимеров и влияние эксплуатационных факторов на стойкость к ВТ.

Зависимость длины ВТ от времени  $L = f(\tau_p)$ , как правило, имеет прямолинейный ха-

рактер, поэтому длину можно представить в следующем виде:  $L = a + b\tau$ , где  $a$  и  $b$  являются параметрами этой зависимости. Если эти параметры известны, то можно основные параметры ВТ вычислить, так как показано [5], что  $\tau_3 = -a/b$ , а параметр  $b = V$ , т.е. является скоростью ВТ.

Проведено исследование различных факторов на характеристики ВТ. Напряженность электрического поля  $E$  оказывает значительное воздействие. Установлено, что длину ВТ можно аппроксимировать соотношением

$$L = a_E + b_E \ln E_M, \quad (1)$$

где  $E_M$  — величина локальной напряженности поля.

Из исследованных кабельных композиций наиболее стойкой к ВТ является ПЭ 153-01К ( $\tau_3 = 200$  ч,  $V = 0,5$  мкм/ч при  $E_M = 270$  кВ/мм).

Хотя силовые кабели работают при промышленной частоте, была исследована зависимость параметров ВТ от частоты. Так, для ПЭ 153-01К при 30 кГц и 270 кВ/мм имеем  $\tau_3 = 0,6$  ч,  $V = 30$  мкм/ч. Установлена аппроксимация длины ВТ от частоты  $f$  и определены параметры этой зависимости:

$$L = a_f + b_f \ln f. \quad (2)$$

Изучение частотных характеристик ВТ дало возможность установить, что механизм воздействия сил электрического поля на полимер меняется с повышением частоты. Это позволило предложить частоты поля как средство для ускорения проведения экспериментов, сокращающее время опыта приблизительно на два порядка. Например, если при 50 Гц параметры ВТ можно определить примерно после 1000 ч эксплуатации и более, то при 30 кГц — после 6—8 ч. С помощью разработанного экспресс-метода можно быстро определить параметры ВТ при разработке новых композиций с различными добавками и структурой, когда из большого числа вариантов необходимо выбрать наиболее стойкие к ВТ, можно быстро получить статистические данные.

Наиболее спорны суждения о влиянии температуры на ВТ: некоторые исследователи утверждают, что она не влияет или слабо влияет, другие считают, что оказывает значительное влияние. С повышением температуры существенно возрастает диффузия воды в полимеры, что снижает их механическую и электрическую прочность. Эксперименты показали однозначно (температуры 20, 40 и 65°C) наличие зависимости параметров ВТ от температуры (см. таблицу). Длину ВТ от температуры можно аппроксимировать зависимостью

Зависимость параметров ВТ от температуры полимеров при  $E_M = 270$  кВ/мм, 50 Гц, 0,5 моль/л водного раствора NaCl

Полимер	Температура, °С	$\tau_3$ , ч	$V$ , мкм/ч
ПЭ 102-01К	20	150	20
	40	70	40
	65	60	65
ПЭ 107-01К	20	180	200
	40	90	100
	65	0,8	90
ПЭ 153-01К	20	65	0,5
	40	75	0,6
	65	0,9	0,7

$$L = a_T + b_T T. \quad (3)$$

Это позволяет производить пересчеты на другие температуры без проведения длительных и сложных экспериментов.

В реальных условиях эксплуатации в окружающей среде имеются водные растворы солей — электролиты. Эксперименты показали значительное влияние электролитов на ВТ, что связано с их электропроводностью и гидратацией. В качестве примера ниже приведены параметры ВТ для композиции ПЭ 107-01К при  $E_M = 270$  кВ/мм, 50 Гц, 20°С, концентрация электролита 0,5 моль/л:

Электро- литы	БДВ	ДВ	KCl	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	МВ	LiCl
$\tau_3$ , ч	610	600	200	180	160	140	130	130	140
$V$ , мкм/ч	0.03	0.03	0.4	0.5	0.5	0.7	0.8	0.9	1.2

Примечание: БДВ — бидистиллированная вода; ДВ — дистиллированная вода; МВ — морская (черноморская) вода.

Анализ результатов показал, что параметры ВТ в зависимости от электропроводности при одинаковой концентрации располагаются в той же последовательности, в какой они приведены выше. Параметры ВТ зависят от электропроводности электролита и геометрических размеров ионов. Ионы меньшего диаметра под действием поля проникают в полимеры легче и быстрее, тем самым снижают время  $\tau_3$  и увеличивают скорость роста ВТ. Такая же зависимость наблюдается с увеличением концентрации электролита  $C$ , а саму зависимость можно аппроксимировать следующим выражением:

$$L = a_c + b_c C. \quad (4)$$

С изменением электропроводности водных растворов может изменяться и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . Эксперименты показали, что изменение значения  $\epsilon$  от 81 для дистиллированной воды до 2,2 для чистого диоксана, который растворяется в воде в любых соотношениях, дает следующие результаты: уменьшение

$\epsilon$  водного раствора снижает  $\tau_3$  и увеличивает скорость роста ВТ. Длину ВТ можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$L = a_\epsilon - b_\epsilon \epsilon. \quad (5)$$

Проведены исследования по выяснению влияния структуры полимеров (кристаллическая и аморфная фазы, надмолекулярная структура, упорядоченные области) на характеристики ВТ. Анализ механизмов разрушения полимеров (термофлюктуационный разрыв связей, химическая деструкция, роль воды в полимере как концентратора механических напряжений в электрическом поле) показывает, что в условиях суммарного воздействия электрического поля и воды структура полимеров играет существенную роль. Эксперименты проводили с целью увеличения стойкости полимерных композиций к ВТ. Исследование серии образцов ПЭНД с различной степенью разветвленности за счет сополимеризации этилена с  $\alpha$ -бутиленом выявило снижение стойкости к ВТ сополимера по сравнению с гомополимером — в основном за счет снижения степени кристалличности и плотности сополимера. Сравнительные испытания сополимеров этилена с винилацетатом показали, что СЭВИЛЕН 113 имеет лучшую стойкость к ВТ по сравнению с исходным ПЭВД и СЭВИЛЕНОМ 115.

Сшитые композиции имеют повышенную стойкость к ВТ за счет более плотной упаковки структуры (поперечная сшивка между боковыми цепями и образование пространственной структуры). В порядке увеличения стойкости к ВТ полимерные композиции расположились следующим образом: наиболее стойкая из несшитых композиций ПЭ 153-01К; ее значительно превосходит сшитая в газообразной среде азота композиция СПЭ(ГА); несколько лучше ее композиция СПЭ(ПВ), сшитая в присутствии паров воды; существенно превосходит ее новая композиция с минеральным наполнителем (частицы наполнителя препятствуют развитию ВТ). С увеличением количества наполнителя стойкость к ВТ растет, но при этом затрудняется экструзия композиции.

В результате совместной работы с предприятием «Полимеркомпозит» (г. Баку) была разработана и испытана серия негорючих композиций на базе ПЭНД с наполнителем и добавками с фирменным названием «ЛИР». Наиболее стойкой к ВТ из этой серии оказалась композиция «ЛИР-10», которая превосходит довольно стойкий к ВТ базовый ПЭНД. Композиция «ЛИР-10» является огнестойкой, обладает хорошими электрическими, физико-механическими и экструзионными свойствами, поэтому она рекомендуется для изготовления образцов

и проведения промышленных испытаний кабелей спецназначения, работающих в агрессивных, пожароопасных и взрывоопасных условиях.

В результате исследования влияния эксплуатационных факторов на параметры ВТ получены математические зависимости, на базе которых разработаны статистические модели зависимости времени до зарождения ВТ от максимальной напряженности электрического поля, температуры, диэлектрической проницаемости и концентрации солей водного раствора и зависимости длины ВТ от этих же параметров и времени до зарождения ВТ. На базе экспериментальных данных определены параметры статистической модели, позволяющей прогнозировать ресурс силового кабеля с полимерной изоляцией в зависимости от эксплуатационных условий.

**Конденсаторная техника.** Пленочные диэлектрики, пропитанные электроизоляционными жидкостями, широко применяются в качестве основной изоляции электрических конденсаторов. Рост требований к удельным и эксплуатационным характеристикам, а также к надежности конденсаторов приводит к необходимости разработки и внедрения новых типов пленок и пропитывающих жидкостей. За последние годы наибольшие изменения произошли в производстве высоковольтных силовых конденсаторов, где в настоящее время широко используются синтетические диэлектрические материалы (двухориентированные полипропиленовые (ПП) пленки и экологически безопасные углеводородные жидкости), а также осуществляется частичная замена фольговых электропроводящих обкладок на тонкопленочные металлизированные. Эти изменения позволили увеличить рабочую напряженность электрического поля  $E_p$  в диэлектрике силовых конденсаторов с фольговыми обкладками до 50 кВ/мм и в диэлектрике с тонкопленочными металлизированными обкладками до 100 кВ/мм и выше [6, 7]. В таких жестких эксплуатационных условиях для оптимального выбора новых конденсаторных материалов и успешного прогнозирования работоспособности силовых конденсаторов необходимо использовать эмпирическую информацию о закономерностях старения конкретных типов конденсаторной пленочной пропитанной изоляции (ППИ).

Выход из строя ППИ силовых конденсаторов промышленной частоты с фольговыми обкладками связан с ухудшением электрических свойств диэлектриков. Разрушение конденсаторной ППИ в отличие от бумажно-масляной изоляции, происходит не только в результате воздействия ЧР, но и за счет физико-химических процессов взаимодействия ПП-пленки и пропитывающей жидкости. Действительно, для пленочной (полипро-

пиленовой) изоляции, пропитанной газостойкими синтетическими углеводородными жидкостями ароматического строения (фенилксилитолуола — «ФКС», смесью моно- и дибензилтолуола — «М/ДБТ» и др.), напряженность возникновения ЧР  $E_{чр}$  существенно превышает  $E_p$  конденсаторной ППИ [7, 8]. Следует отметить, что ЧР, возникающие в ППИ при наличии грубых дефектов или при воздействии на конденсаторы перенапряжения, имеют тенденцию к полному исчезновению («затуханию») в течение короткого промежутка времени [9] и поэтому вряд ли могут существенно влиять на разрушение ППИ.

Лабораторные исследования силовых конденсаторов, прошедших ресурсные испытания (при  $E_p \leq E_{чр}$ ) [10], зафиксировали существенное увеличение тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  пропитывающей жидкости (ФКЭ, М/ДБТ) и уменьшение кратковременной электрической прочности  $E_{пр}$  ПП-пленки по сравнению с их исходным состоянием. Следует отметить, что рост  $\operatorname{tg} \delta$  «состаренной» жидкости тем значительнее, чем выше испытательная напряженность электрического поля в прослойке жидкости  $E_{исп.ж}$ , что связано, главным образом, с ростом температуры изоляции  $T_{и}$ . Так, значение  $\operatorname{tg} \delta$  ФКЭ, состаренного при  $E_{исп.ж} = 41$  кВ/мм и  $T_{и} = (60-65)^\circ\text{C}$ , более чем в 2 раза превышает  $\operatorname{tg} \delta$  исходного ФКЭ, а при  $E_{исп.ж} = 54$  кВ/мм и  $T_{и} = (75-80)^\circ\text{C}$  различие достигает одного порядка. Указанное увеличение диэлектрических потерь «состаренного» ФКЭ обусловлено ростом проводимости за счет появления дополнительных носителей электрического заряда (низкомолекулярных примесей и атактической фракции полипропилена), десорбируемых из аморфной фазы ПП-пленки при ее взаимодействии с пропитывающей жидкостью.

Наличие полипропиленсодержащих составляющих в пробах ФКЭ из конденсаторов, прошедших ресурсные испытания, было подтверждено [10] результатами хроматомасс-спектрометрического анализа и методом фракционной очистки. Вымывание составляющих из ПП-пленки приводит к нарушению ее надмолекулярной структуры (уменьшению степени кристалличности и конфигурации межфазной границы) и формированию дефектов (субмикротрещин) в межфазных областях. Образующиеся субмикротрещины заполняются пропитывающей жидкостью, которая производит расклинивающее действие на стенки, увеличивая тем самым их размеры. В конечном итоге, происходит расщепление кристаллической фазы на микроблоки, что приводит к разрыхлению структуры ПП-пленки и образованию сквозных пар (каналов протекания), заполненных жидкостью. Подобные изменения

приводят к увеличению электропроводности и уменьшению  $E_{пр}$  ПП-пленки.

Скорость старения конденсаторной ППИ зависит от условий эксплуатации, а также от химического строения пропитывающей жидкости и структуры ПП-пленки. Чем больше степень ароматичности  $K_a$  жидкости и рыхлость упаковки надмолекулярной структуры ПП-пленки, тем выше интенсивность взаимодействия фаз изоляции и, следовательно, скорость разрушения ПП-пленки. С другой стороны, высокое содержание ароматических компонентов в макромолекуле пропитывающих жидкостей обеспечивает их высокую газопоглощающую способность и, тем самым, снижает вероятность возникновения критических ЧР.

Повышение работоспособности конденсаторной ППИ может быть достигнуто применением модифицированных ПП-пленок, способных замедлять процесс сорбиции. Практический интерес, с этой точки зрения, представляют пленки, характеризующиеся повышенным содержанием ориентированной кристаллической фазы в поверхностных слоях («транскристаллитный» слой). Опытные образцы ПП-пленки подобной структуры были получены охлаждением при контакте с подложкой (плавленный кварц), обладающей высокой поверхностной энергией. Сопоставление результатов старения (с использованием модельных образцов) ПП-пленок с «транскристаллитным» слоем и промышленных ПП-пленок (с неупорядоченным расположением аморфной и кристаллической фаз по объему), выявило (рис. 1 и 2) преимущество опорных образцов.

В идентичных условиях испытаний величина  $E_{пр}$  ПП-пленок с «транскристаллитной» структурой в 1,5–2,5 раза превосходит  $E_{пр}$  промышленных образцов (ТУ619-051-615-87), причем в процессе старения в контакте с ФКЭ электрическая прочность опытных пленок не снижается, в отличие от промышленных, имеющих тенденцию к устойчивому уменьшению (рис. 1). Эмпирические функции распределения  $E_{пр}$  пленок с «транскристаллитной» структурой на всех временных участках старения (рис. 2) аппроксимируются отрезками прямых линий без из-

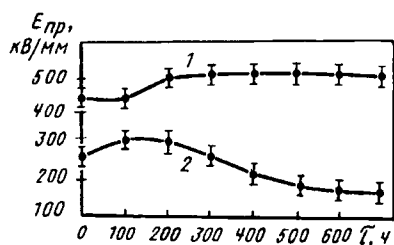


Рис. 1. Зависимость  $E_{пр}$  опытной ПП-пленки с «транскристаллитным» слоем (1) и промышленной ПП-пленки (ТУ619-051-87) (2) от продолжительности старения (100°C, 40 кВ/мм) в контакте с ФКЭ

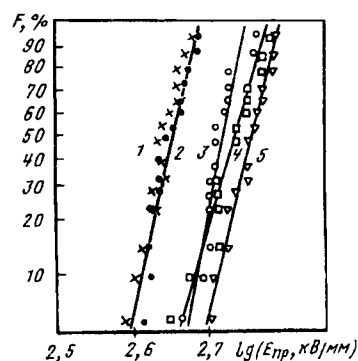


Рис. 2. Функции распределения  $E_{пр}$  ПП-пленки с «транскристаллитным» слоем при разной продолжительности старения (100°C, 40 кВ/мм) в контакте с ФКЭ: 1 — исходное состояние; 2 — 100 ч; 3 — 200 ч; 4 — 400 ч; 5 — 600 ч

ломов, что свидетельствует об отсутствии дефектов в пленке. Следовательно, «транскристаллитный» поверхностный слой затрудняет процесс проникновения пропитывающих жидкостей в ПП-пленку и тем самым снижает вероятность разрушения ее надмолекулярной структуры и ухудшения электрофизических свойств.

Разрушение конденсаторной ППИ с металлизированными тонкопленочными металлизированными обкладками происходит, главным образом, в результате деметаллизации обкладок за счет процессов самовосстановления электрической прочности и краевой эрозии обкладок. При выборе пропитывающих жидкостей для металлопленочной изоляции силовых конденсаторов, наряду с обычными требованиями (высокие значения электрической прочности и газопоглощающей способности, низкие значения диэлектрических потерь, экологическая безопасность) необходимо учитывать и ряд специальных требований, главными из которых являются инертность к материалу тонкопленочного покрытия и способность снижать интенсивность деметаллизации. Ранее [11] было установлено, что полидиметилсилоксановые (ПМС) жидкости, в отличие от ароматических углеводородов, в эксплуатационных условиях практически не взаимодействуют с металлизированными ПП-пленками, определяя, тем самым, высокую стабильность металлопленочных конденсаторов. Учитывая это, нами проводилась экспериментальная оценка способности этих жидкостей препятствовать разрушению металлизированных обкладок в электрическом поле.

Скорость краевой эрозии  $V_э$  металлизированных секций, пропитанных ПМС, существенно ниже, чем непропитанных и пропитанных ФКЭ. С увеличением вязкости ПМС значение  $V_э$  уменьшается, что обусловлено более низкой интенсивностью ЧР в образцах, пропитанных вы-

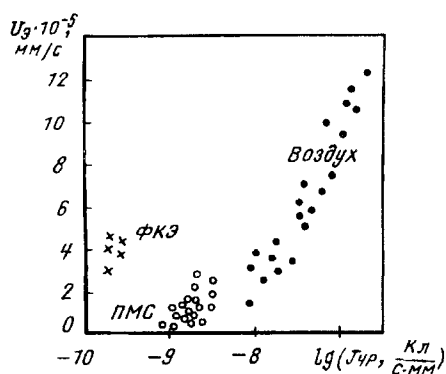


Рис. 3. Диаграмма рассеяния эмпирических значений  $V_э$  и  $\lg J_{ср}$  для металлопленочных модельных образцов не-пропитанных (•) и пропитанных ФКЭ (×) и ПМС (о)

соковязкими жидкостями (ПМС-50, 100). Подтверждением является установленная корреляционная зависимость между скоростью краевой эрозии  $V_э$  и плотностью среднего тока ЧР  $J_{ср}$  в непропитанных образцах и пропитанных ПМС (рис. 3). Следует отметить, что для металлопленочных образцов, пропитанных ФКЭ, соотношение между  $V_э$  и  $J_{ср}$  не удовлетворяет установленной корреляционной зависимости, поскольку при значительно более низких значениях  $J_{ср}$  скорость эрозии для образцов, пропитанных ФКЭ, практически соответствует значениям  $V_э$  для непропитанных образцов. Очевидно, это связано со снижением адгезии слоя металлизации в результате взаиморастворения ФКЭ и ПП-пленки. Снижение адгезии способствует отслаиванию металлизированного слоя даже при воздействии незначительных по уровню ЧР.

Таким образом, применение кремнийорганических жидкостей высокой вязкости (ПМС-50Ю 100) снижает интенсивность критических ЧР и тем самым уменьшает скорость разрушения металлопленочной конденсаторной изоляции.

**Выводы.** 1. Экспериментально исследованы процессы старения диэлектрических материалов, используемых в силовых кабелях с полимерной изоляцией и в силовых конденсаторах с пленочными диэлектриками, пропитанными электроизоляционными жидкостями. Для силовых кабелей основное внимание при исследованиях сосредоточено на водных тринингах, для силовых конденсаторах — на частичных разрядах как на параметрах, ответственных, в первую очередь, за старение электрической изоляции рассматриваемых электротехнических изделий.

2. Исследование влияния внешних факторов на процесс зарождения и развития водных тринингов в полимерной изоляции силовых кабелей дало возможность разработать статистическую модель, позволяющую прогнозировать ресурс силового кабеля указанного типа в зависимости

от эксплуатационных условий.

3. Показано, что для силовых конденсаторов с пленочным диэлектриком использование кремнийорганических электроизоляционных жидкостей в качестве пропитки ведет к уменьшению интенсивности процессов, ответственных за старение конденсаторной изоляции в электрическом поле.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канискин В.А. Влияние электрического поля на процесс увлажнения электрической изоляции. — Электричество, 1991, № 10.
2. Михайлов М.М. Влагопроницаемость органических диэлектриков. — М.: Л.: Госэнергоиздат, 1960.
3. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. — М.: Химия, 1987.
4. Белоусов Ф.А., Вердина Я.В., Гапченко Е.Л. и др. Влияние электрического поля на увлажнение полимерной электрической изоляции. — Электричество, 1997, № 11.
5. Канискин В.А., Середа Г.Г. Оценка стойкости кабельной ПЭ изоляции к водным тринингам. — Изв. вузов. Энергетика, 1989, № 12.
6. Кучинский Г.С., Назаров Н.И. Силовые электрические конденсаторы. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
7. Yoshida Y., Nishimatsu M. Power capacitors. — IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, vol. EI-12, № 6.
8. Галахова Л.Н. Косинусные высоковольтные конденсаторы с чистопленочным диэлектриком и пропиткой экологически безопасными жидкостями. — М.: Информэлектро, 1988.
9. Кучинский Г.С., Пильщиков В.Е., Чуракова Н.А., Галахова Л.Н. Характеристика частичных разрядов в силовых конденсаторах промышленной частоты с пленочной изоляцией, пропитанной экологически безопасными жидкостями. — Труды ЛГТУ. Высоковольтная электроэнергетика и электрофизика, 1991, № 439.
10. Андреев А.М., Журавлева Н.М., Александрова Н.П., Галахова Л.Н. Изменение эксплуатационных характеристик пленочно-пропитанной изоляции силовых конденсаторов вследствие взаимодействия ее компонентов. — Электротехника, 1991, № 3.
11. Андреев А.М., Журавлева Н.М., Молодова Л.А., Луцкая Т.В. Выбор пропитывающих жидкостей для высоковольтных металлизированных конденсаторов. — Электротехника, 1994, № 4.

[24.09.98]

**Авторы:** Андреев Александр Михайлович окончил электромеханический факультет Чувашского государственного университета в 1972 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте, ЛПИ (ныне СПбГТУ) по исследованию процесса старения жидких диэлектриков. Доцент СПбГТУ.

**Канискин Владимир Александрович** окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1961 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию в ЛПИ по тематике, связанной с исследованием электрических свойств полимерных материалов. Доцент СПбГТУ.

**Полонский Юрий Александрович** окончил радиофизический факультет ЛПИ в 1959 г. В 1976 г. защитил докторскую диссертацию в Институте химии силикатов АН СССР. Профессор, заведующий кафедрой «Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы» электромеханического факультета СПбГТУ.

# Информационные технологии для обеспечения надежности электрических машин

МАРТЬЯНОВ М.В., ПОПОВ В.В., СОКОЛОВА Н.В.

По мере развития электромашиностроения проблемы обеспечения надежности генераторов решаются посредством различных технико-организационных мероприятий, реализуемых в процессе создания и при эксплуатации генераторов. Технический уровень и эффективность таких мероприятий непрерывно повышаются по мере накопления опыта их реализации и совершенствования технических средств информатики. Однако до настоящего времени набор отдельных мероприятий еще не представляет завершенной системы, базирующейся на единой методологической основе. Такой основой, на наш взгляд, могли бы стать непрерывно совершенствующиеся компьютерные технологии проектирования, производства, промышленных испытаний и эксплуатации, широко используемые в современном электромашиностроении.

**Ключевые слова:** электрогенератор, надежность, проектирование, производство, испытания, эксплуатация, информационные технологии

Обеспечение надежности электрических машин (ЭМ) достигается с помощью различных, чаще всего независимых технико-организационных мероприятий, реализуемых в процессе создания и использования технического объекта. Представляется актуальной задача интегрирования технологий таких мероприятий как взаимодействующих элементов в систему на единой методологической основе. Такой основой, на наш взгляд, могла бы стать информационная технология обеспечения надежности (ИТОН), рассматриваемая в перспективе как составная часть целевого информационно-технологического процесса повышения эффективности ЭМ.

Реализация таких технологий целесообразна в рамках внедряемых в настоящее время автоматизированных систем поддержки технологических процессов проектирования (САПР), технологии производства (АСТП), промышленных испытаний (АСПИ) и технологии эксплуатации (АСТЭ), соответствующих этапам жизненного цикла технического объекта. Технология ИТОН объединяет перечисленные выше системы в замкнутую, адаптивную автоматизированную систему обеспечения надежности и эффективности (АСОН), состоящую из связанных между собой локальных систем и подсистем (рис. 1). Надежность реализуется на этапе эксплуатации, который обеспечивается тремя подсистемами: противоаварийного регулирования и контроля (САРиК), технической

*As the electrical machine industry develops problems of insuring the reliability of generators are solved by means of various technical and organizational measures which realized during the process of creation and exploitation of generators. The technical level and the effectiveness of such measures are uninterruptedly increased as acculated and information technical means are improved. But untill the present time the composition of separate measures does not yet represent a completed system grounded on the united methodological basis. From our point of view computer technologies of designing, manufacturing, industrial tests and exploitation, which are uninterruptedly improved and widely used in the modern electrical machine industry, can be used for developing the above mentioned methodological basis.*

**Key words:** generators, reliability, designing, manufacturing, tests, exploitation

диагностики и прогностики (АСТДиП), а также сервисного обслуживания и восстановления технического состояния (АСТС).

Основными интеграционными компонентами АСОН являются естественные атрибуты информационных технологий (ИТ). Это система управления базами данных (СУБД) и база данных о характеристиках надежности ЭМ, а также система управления базами знаний (СУБЗ), которая первоначально может рассматриваться как система обучения (СО), формулирующая цели и реализующая содержание различных уровней подготовки специалистов.

Использование современных ИТ в качестве

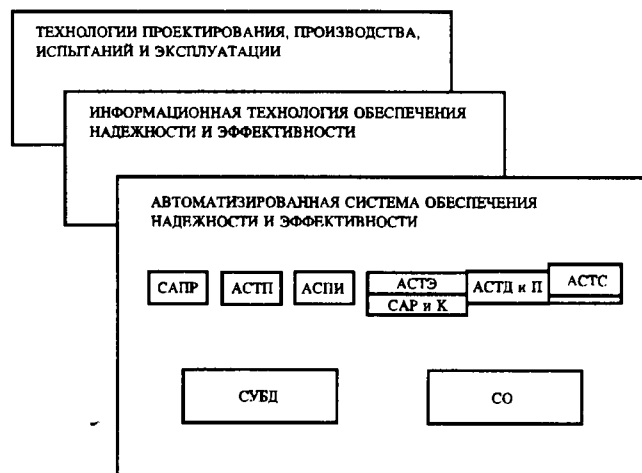


Рис. 1. Схема построения АСОН

единой методологической основы представленной системы ставит задачу разработку совместного математического обеспечения и программных средств для каждой из локальных систем и подсистем. Существенно, чтобы программные средства реализовывали математические модели высокого уровня адекватности. Это необходимо для обеспечения высокой достоверности прогнозирования условий безаварийной эксплуатации ЭМ. Непрерывно расширяющиеся возможности ИТ ставят задачу совершенствования каждой из ныне действующих локальных систем. Рассмотрим последовательно методологические проблемы создания и использования наиболее существенных компонентов представленной системы.

**Автоматизированная система поддержки технологических процессов проектирования.** Математическое обеспечение и программные средства прикладных САПР, которые все чаще реализуются в универсальных CAD/CAE компьютерных системах проектирования и исследования, традиционно решают задачи оптимизации конструкций и функциональных характеристик ЭМ. При этом, как правило, используются детерминированные математические модели различного уровня адекватности. Адаптивная автоматизированная система обеспечения надежности и эффективности дополнительно обеспечивает проведение численных исследований различных локальных особенностей распределения физических полей и процессов в основных узлах ЭМ.

Как известно, интенсивность физических воздействий в локальных зонах с характерными структурными особенностями является в большинстве случаев определяющим фактором для безопасной работы ЭМ. Так, новые конструкторско-технологические возможности повысили интерес к созданию турбогенераторов с непосредственным воздушным охлаждением. Но такая система весьма чувствительна к различным аэродинамическим факторам. Поэтому при проектировании эти факторы необходимо учитывать, ориентируясь на современные ИТ и методы математического моделирования. В [1] представлены результаты исследования аэродинамических свойств одной из современных систем непосредственно воздушного охлаждения турбогенератора ТГ-60-2. Для нагнетательной и вытяжной систем охлаждения оценено влияние на эти свойства зависимости аэродинамических сопротивлений от расхода газа, вращения ротора, геометрических соотношений и т.д.

На рис. 2 показано влияние вариации расчетной величины воздушного зазора  $d$  и высоты подпазового канала  $h$  на характер распределения расхода воздуха по номерам вертикальных каналов  $N$ , начиная от торца ротора к его середине,

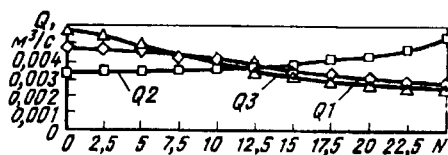


Рис. 2. Распределение расхода воздуха при вариации базовых размеров воздушного зазора  $D_6$  и подпазового канала  $H_6$  ( $Q1-d=1/5D_6$ ,  $h=H_6$ ;  $Q2-d=D_6$ ,  $h=H_6$ ;  $Q3-d=1/5D_6$ ,  $h=1,5H_6$ )

при совокупном воздействии анализируемых факторов.

Интенсивность локальных процессов существенно зависит от вида режима и особенностей структуры локальных зон. Однако она еще более повышается при наличии различных технологических и эксплуатационных дефектов, которые случайным образом могут возникнуть в процессе изготовления или работы ЭМ. Установление закономерностей воздействия интенсивности и распределения дефектов на выходные параметры объекта исследования получило название диагностического моделирования — вследствие использования такой информации для процедур технической диагностики. Учет стохастической взаимосвязи и взаимообусловленности физических полей и процессов позволяет прогнозировать параметрическую надежность ЭМ на стадии проектирования.

Проиллюстрируем сказанное на примере тепловой разбалансировки ротора мощного турбогенератора с водяным охлаждением обмотки возбуждения [2]. Известно, что роторы турбогенераторов с форсированным водяным охлаждением чувствительны к тепловой разбалансировке. Различие температур в диаметральных точках на поверхности ротора в один градус может вызвать высокий уровень вибраций в опорах. Поэтому при проектировании необходимо предвидеть все существенные факторы, способные вызвать асимметричное распределение температурного поля в поперечном сечении ротора.

Среди разнообразных факторов особо следует выделить технологические факторы, которые формируют предрасположенность машины к тепловой разбалансировке на стадии ее изготовления. Большинство факторов может иметь вероятностные характеристики. Поэтому оказывается возможным и целесообразным прогнозировать вероятностный уровень обусловленных ими вибраций. Прогнозируемые значения вероятности можно рассматривать как показатели параметрической надежности по заданному критерию.

На рис. 3 представлен прогноз тепловой разбалансировки ( $A_{\text{доп}}$  — допустимая амплитуда вибрации) для ТГ-ТЗВ-800, обусловленной технологическим разбросом сечений каналов охлаждения ротора (кривая 1) и толщины изоляции

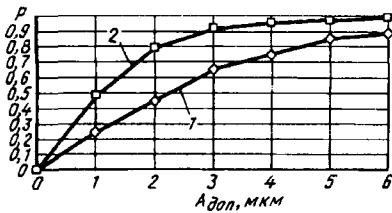


Рис. 3. Прогноз вероятности безотказной работы  $P$  турбогенератора ТЗВ-800 в условиях возможной тепловой разбалансировки ротора

по пазам ротора (кривая 2). Видно, что влияние некоторых технологических факторов на вибрационную надежность ротора может быть существенным. Поэтому подобного рода оценки, выполненные на стадии проектирования, позволяют конкретизировать требования к технологическим допускам на комплектующие изделия и создают предпосылки для целенаправленного управления технологией производства.

**Автоматизированная система поддержки технологических систем производства.** Практикой современной организации технологии производства является непосредственное информационное сопряжение CAD/CAE систем проектирования и исследования с CAM системами автоматизации производства и оборудованием программного управления. В частном случае конечным результатом может быть изготовление физической модели проектируемой детали. Особый интерес представляют ИТ проектирования виртуального производства, включая проектирование помещений, парка технологического оборудования, а также самого технологического процесса производства. На отечественном рынке такие системы представляет британская компания DELCAM.

**Автоматизированная система промышленных испытаний.** Промышленные испытания ЭМ являются началом натурной оценки правильности заложенных в проекте расчетов. Методология их проведения и автоматизации процесса сбора и обработки данных в практике электромашиностроения традиционно находятся на высоком уровне. Общей тенденцией является усиление диагностического аспекта промышленных испытаний, повышение их информативности. Этот этап может быть охарактеризован как этап тестовой функциональной диагностики начала эксплуатации, результаты которой непосредственно используются при управлении объектом, контроле функциональных и структурных параметров. Современные технологии программного пакета LabVIEW и других интегрированных сред визуального программирования для систем измерения, сбора и представления измерительной информации создают принципиально новую приборную базу для экспериментально-лабораторных

исследований, являются непосредственным примером внедрения ИТ в практику промышленных испытаний.

**Автоматизированная система поддержки технологических процессов эксплуатации.** Повышение использования материалов привело к необходимости регулирования не только основных электромеханических, но и сопутствующих термодинамических процессов. Для целей обеспечения надежности электрогенераторов, в частности, необходимо, чтобы в САРиК разрабатывались и внедрялись системы регулирования, стабилизирующие напряженное состояние отдельных элементов и узлов при резкопеременных нагрузках. Известно, например, что одной из главных причин отказов турбогенераторов являются повреждения корпусной изоляции стержней обмотки статора в местах их выхода из пазов. Повреждения эти обусловлены термомеханическими деформациями сжатия—растяжения изоляции при резких изменениях нагрузки. Детальный анализ этих процессов показывает, что в машинах с эффективными системами непосредственного охлаждения обмоток статора тепловое состояние их изоляции можно стабилизировать посредством автоматического регулирования расхода хладагента в канале [3].

На рис. 4,а представлены температурно-временные зависимости для меди обмотки статора ТГ-ТВВ-320 при компенсации расходом воды наброса нагрузки с разными выдержками времени. На кривых 1—4 выдержки времени соответственно составляют 2,0, 1,0, 0,5 и 0 мин. На рис. 4,б показаны и соответствующие временные зависимости термомеханических напряжений в изоляции. Видно, что при задержке увеличения расхода воды менее 1,5 мин, можно добиться практически полной стабилизации теплового состояния изоляции обмотки статора, а следовательно, существенно повысить ее надежность при переменных нагрузках.

Перспективным средством повышения эксплуатационной надежности становятся автома-

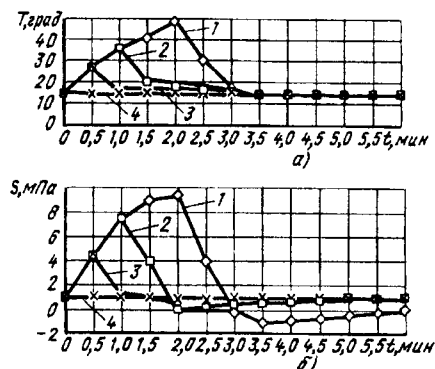


Рис. 4. Стабилизация термомеханического состояния обмотки при набросе нагрузки

тизированные системы технической диагностики, использующие современные ИТ (АСТД). Представление информации о процессах в диагностируемых машинах может быть различным. По нашему мнению, определенными преимуществами обладает информационная модель, представленная в виде граф-модели, т.е. графа, в котором его элементам присвоен структурно-функциональный содержательный смысл объекта. Множество вершин образуется из описания физически существенных свойств объекта диагностирования; множество ребер — отношениями причинно-следственных связей между вершинами.

Создание практически работоспособной граф-модели является сложной многокритериальной задачей системного анализа. Основные этапы этой работы связаны с классификацией вершин, в частности, с выделением оптимального множества диагностических параметров, удовлетворяющего критериям распознавания при минимальной его мощности. Понятно, что параметры, являющиеся элементами множества, должны быть доступны для контроля и наблюдения без разбора объекта, а время, затрачиваемое для их контроля, и стоимость контроля — наименьшими. Наиболее перспективные процедуры распознавания дефектов основываются на общей теории распознавания, методологии нейронных сетей feedforward с использованием алгоритмов backpropagation, представляющего собой градиентный метода, а также методологии построения дискриминантных функций в пространстве параметров-признаков. Источниками первоначальной информации для обучения соответствующих систем являются реализации разработанных диагностических моделей, статистические данные эксплуатации и экспертные оценки специалистов. Полученная информация о техническом состоянии ЭМ является основой для статистико-вероятностного прогнозирования надежности по фактическому техническому состоянию, а также обеспечения сервисного обслуживания в сопровождении АСТС.

**Выводы.** 1. Интегрирование отдельных технологий по обеспечению надежности как взаимодействующих элементов в единую систему на базе современных ИТ существенно расширяет возможности повышения надежности и эффек-

тивности ЭМ.

2. Создание АСОН потребует дополнительных исследований, среди которых первоочередным, по-видимому, являются разработка методологии системного анализа технического состояния и исследование динамики стохастических характеристик структурных параметров ЭМ в процессе эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартьянов М.В., Попов В.В., Синельникова Е.Л. Исследование аэродинамических свойств системы непосредственного воздушного охлаждения ротора турбогенератора. — Научно-технич. конф. 5 секции РАН. С-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1996.
2. Попов В.В., Мартьянов М.В., Федоренко В.В. Прогнозирование тепловой разбалансировки массовых роторов синхронных машин. — Электротехника, 1992, № 12.
3. Мартьянов М.В., Исса Р.Н. Термомеханические процессы в стержневых обмотках турбогенераторов с водяным охлаждением в маневренных и аварийных режимах эксплуатации / Ленингр. гос. технич. ун-т, 1991. Деп. в Информэлектро. 6.05.91, № 28-ЭТ91.

[24.09.98]

*Авторы: Мартьянов Михаил Васильевич окончил Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) в 1979 г. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Математические модели и диагностические характеристики тепловой разбалансировки роторов турбогенераторов с водяным охлаждением». Работает в Санкт-Петербургском государственном техническом университете (СПбГТУ) на кафедре электрических машин.*

*Попов Виктор Васильевич окончил ЛПИ в 1955 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Электромагнитные и тепловые поля и процессы в роторах мощных турбогенераторов при аномальных режимах». Работает в СПбГТУ на кафедре электрических машин.*

*Соколова Наталья Викторовна окончила ЛПИ в 1983 г. В 1994 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Разработка объектно-ориентированной многоуровневой модели параллельных вычислений и ее применение для проектирования мультипроцессорных вычислительных систем». Работает в СПбГТУ на кафедре автоматизации и вычислительной техники.*

# Анализ волновых процессов в системах с распределенными параметрами методом синтетических схем

КОРОВКИН Н.В., СЕЛИНА Е.Е.

*Предложена методика решения задач анализа процессов в системах, включающих устройства с распределенными параметрами при действии внешнего импульсного электромагнитного поля. Рассмотрены методы построения математических моделей таких систем в виде многозвенных схем замещения, предложены различные подходы к определению их параметров, позволяющие учитывать реальные частотные зависимости эквивалентных параметров устройств. В качестве численного метода анализа процессов в распределенных системах используется метод синтетических схем. Предложены методы формирования и выявлены численные особенности синтетических схем. Доказаны теоремы, позволившие существенно повысить эффективность решения задачи анализа импульсных процессов в распределенных системах.*

**Ключевые слова:** электрические цепи, распределенные параметры, импульсные электромагнитные поля, волновые процессы, синтетические схемы, анализ

Рассмотрим задачу анализа воздействия внешнего импульсного электромагнитного поля на систему, содержащую устройства с распределенными по одной пространственной координате параметрами. Будем предполагать, что процессы в каждом из таких устройств удовлетворительно описываются с помощью уравнений типа телеграфных, а сами устройства могут рассматриваться как некоторые двух- или многопроводные длинные линии. В местах сопряжения устройств могут располагаться нелинейные нагрузки. При решении таких задач обычными являются допущения об однородности (кусочной однородности) параметров устройств по координате, а также линейности их параметров, принимаемые и в данной работе. Основное внимание далее уделяется построению математических моделей устройств с распределенными параметрами в виде длинных линий и анализу процессов в системах, состоящих из устройств такого типа. Поэтому математические модели соединяющих (концевых) нагрузок, а также математические модели внешнего воздействия (электромагнитной обстановки) не рассматриваются. Относительно нагрузок предполагается, что свойства каждой из них достаточно хорошо воспроизводятся их схемами замещения (линейными или нелинейными). Внешнее возмущающее электромагнитное поле предполагается заданным во всех точках

*Methods are proposed for solving problems of an analysis of processes in systems containing devices with distributed parameters under the action of an external pulse electromagnetic field. Methods for constructing mathematical models of such system in the form of multisection equivalent circuits are considered. Various approaches to the determination of the parameters of this circuits, which make it possible to take into account real frequency dependences of the devices' equivalent parameters. The method of synthetic schemes has been used as a method for an analysis of processes in distributed systems. Shaping methods are proposed and numerical features of synthetic schemes are revealed. Theorems, which made it possible to significantly increase the effectiveness of an analysis of pulse processes in distributed systems are proved.*

**Key words:** electrical circuits, distributed parameters, pulse electromagnetic fields, wave processes, synthetic schemes, analysis

пространства, влияние токов линий на внешнее поле не учитывается. Подразумевается также, что внешнее электромагнитное поле имеет импульсный характер, подобный полю, вызванному искровым разрядом, разрядом молнии, ядерным взрывом, излучением радара и т.д.

Область, очерченная указанными допущениями, включает в себя значительное число технических задач, таких как расчеты волновых процессов и перенапряжений в воздушных и кабельных сетях, анализ воздействия внешних электромагнитных полей на системы связи и информационные системы, задачи электромагнитной совместимости.

Решение этих задач представляет существенные трудности, связанные с учетом реальной частотной зависимости эквивалентных параметров устройств, моделируемых как длинные линии, а также с необходимостью учета излучения электромагнитной энергии при рассмотрении быстротекущих процессов. Поэтому для их решения целесообразна разработка специальных методов, позволяющих учитывать все основные свойства задач и выполнять их исследование с помощью эффективных и информационно компактных алгоритмов.

В настоящей статье рассмотрены методы построения математических моделей устройств с распределенными параметрами в виде много-

звенных схем замещения, предложены различные подходы к определению параметров этих схем, позволяющие учитывать реальные частотные зависимости эквивалентных параметров устройств. В качестве численного метода анализа процессов в распределенных системах используется метод синтетических схем (МСС) [1]. Предложены методы формирования и выявлены численные особенности синтетических схем анализируемых устройств и на их основе доказаны алгоритмы, позволяющие эффективно решать задачи анализа волновых процессов в системах с распределенными параметрами.

**Основные уравнения.** Схема замещения длинной линии, рассматриваемая как математическая модель устройства, должна адекватно отображать волновой процесс в линии и воспроизводить зависимость от частоты параметров устройств. Структура и параметры схемы замещения могут быть легко определены, когда уравнения, описывающие процессы в линии, сводятся к виду телеграфных уравнений. Переходя в операторную область, для изображений векторов напряжений  $U(p, x)$  и токов  $I(p, x)$  имеем:

$$\begin{aligned} -\frac{dU(p, x)}{dx} &= Z(p) I(p, x) + E(p, x); \\ -\frac{dI(p, x)}{dx} &= Y(p) U(p, x), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E(p, x)$  — операторное изображение тангенциальной составляющей электрического поля;  $Z(p)$  и  $Y(p)$  — матрицы параметров системы.

Аналогичный вид имеет система уравнений, описывающая распространение электромагнитных волн вдоль коаксиальных линий, обмоток трансформатора, цилиндрических экранов.

Определение элементов матриц  $Z(p)$  и  $Y(p)$  для устройств различной геометрии представляет сложную задачу. Важным для практики результатом ее решения являются полученные в [2] аналитические выражения  $Z(p)$  и  $Y(p)$  для системы, представленной на рис. 1. Решение [2] может быть обобщено на случай  $s$  параллельных проводов над проводящей поверхностью земли с конечными  $\mu$ ,  $\epsilon$ ,  $\rho$ . При  $s=1$  матрицы  $Z(p)$  и  $Y(p)$  переходят в скаляры и выражения

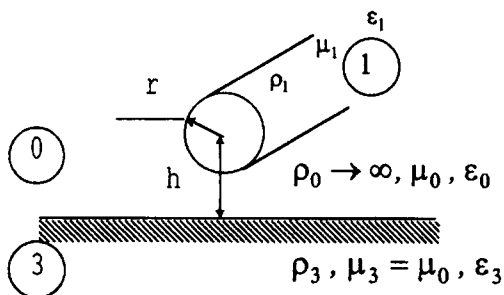


Рис. 1

для  $Z(p)$  и  $Y(p)$  имеют вид:

$$Y(p) = \frac{2\pi\epsilon_0 p}{N+M}; \quad Z(p) = \frac{p\mu_0}{2\pi} (N+M+F);$$

$$\eta_\nu = (\xi^2 - \delta_\nu^2)^{1/2}; \quad F = \frac{2}{K_3^2 - K_2^2} \int_0^\infty (\eta_2 - \eta_3) e^{-2g\eta_2} d\xi;$$

$$D = 2K_2^2 \int_0^\infty \frac{e^{-2g\eta_2} d\xi}{K_3^2 \eta_2 + K_2^2 \eta_3}; \quad M = \frac{1}{r\mu_0} \left( \frac{2\mu_1 \rho_1}{p} \right)^{1/2};$$

$$N = \frac{\pi}{2j} (H_0^{(1)}(2g\delta_2) - H_0^{(1)}(r\delta_2));$$

$$K_\nu = p(-\mu_\nu(\epsilon_\nu + 1/p\rho_1)); \quad \text{Im } K_\nu > 0,$$

$$\nu = 1, 2, 3; \quad \text{Re } \eta_\nu > 0, \quad \nu = 2, 3,$$

где  $H_0^{(1)}$  — функция Ханкеля первого рода и нулевого порядка.

Последние соотношения дают возможность определять параметры математических моделей большого числа устройств (элементов устройств) в весьма широком частотном диапазоне.

При моделировании протяженных устройств, обладающих сложной геометрией поперечного сечения, матрицы параметров  $Z(p)$  и  $Y(p)$  ( $Z(j\omega)$  и  $Y(j\omega)$ ) могут быть определены с помощью численных расчетов либо получены экспериментально. При этом расчеты электромагнитного поля и эксперимент должны выполняться для всего определяющего спектра частот внешнего импульсного электромагнитного поля.

Использование аналитически или численно определенных  $Z(p)$  и  $Y(p)$  для моделирования частотных свойств устройств (элементов устройств) корректно при справедливости допущения об однородности параметров по пространственной координате. Если это допущение не может быть принято, то построение математических моделей для исследования быстротекающих процессов следует производить с учетом эффекта излучения электромагнитной энергии вблизи неоднородностей линии.

Система интегродифференциальных уравнений, учитывающая явление излучения двухпроводной линией конечной длины  $l$  без потерь при облучения линии переменным электромагнитным полем, имеет вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU(x)}{dx} &= -p \frac{\mu}{4\pi} \hat{F}\{I(x)\} + E(h, x); \\ \frac{d\hat{F}\{I(x)\}}{dx} &= -p4\pi\epsilon U(x) + \hat{g}(x, l) I(l) - \hat{g}(x, 0) I(0); \\ \hat{F}\{I(x)\} &= \int_0^l \hat{g}(x, x') I(x') dx'; \\ \hat{g}(x, x') &= \frac{e^{-jK\sqrt{(x-x')^2 + a^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + a^2}} - \frac{e^{-jK\sqrt{(x-x')^2 + 4h^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + 4h^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $a$  — радиус проводов;  $2h$  — расстояние между проводами;  $K=\omega/c$  — волновое число;  $U(x)$ ,  $I(x)$  — соответственно напряжение и ток в линии;  $\mu$ ,  $\varepsilon$  — параметры среды;  $E(h, x)$  — тангенциальная составляющая вектора напряженности электрического поля;  $\hat{g}$  — функция Грина задачи.

В [3] показано, что для низких частот при выполнении условий  $Kh \ll 1$ ,  $2h \ll l$ , уравнения (2) переходят в систему уравнений длинной линии.

Для приведения (2) к уравнениям телеграфного типа, а также с целью значительного улучшения численных свойств задачи выполним регуляризацию (2). В окрестности точки  $x'=x$  модуль функции Грина  $g$  — существенно неоднородная функция (имеет резко выраженный максимум). Представим функцию  $F\{I(x)\}$  в виде

$$\hat{F}\{I(x)\} = F\{I(x)\} + I(x)R(x), \quad (3)$$

где

$$R(x) = \int_0^l g(x, x') dx'; \quad g(x, x') = \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + 4h^2}}.$$

Функцию  $g(x, x')$  естественно назвать регуляризующей функцией для функции Грина  $\hat{g}(x, x')$ , а функцию  $R(x)$  — регуляризующей функцией задачи (2):

$$R(x) = \ln \frac{(x + \sqrt{x^2 + a^2})(x - l + \sqrt{(x-l)^2 + 4h^2})}{(x + \sqrt{x^2 + 4h^2})(x - l + \sqrt{(x-l)^2 + a^2})}.$$

Подставляя (3) в (2) получаем

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU(x)}{dx} + L'(x)pI(x) &= -\frac{\mu}{4\pi}pF\{I(x)\} + E(h, x); \\ \frac{dI(x)}{dx} + C'(x)pU(x) &= -\left(\frac{\partial F\{I(x)\}}{\partial x} + \right. \\ &\left. + I(x)\frac{dR(x)}{dx} + \hat{g}(x, l)I(l) - \hat{g}(x, 0)I(0)\right)/R(x). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Величины  $L'(x)=(\mu/4\pi)R(x)$ ,  $C'(x)=4\pi\varepsilon/R(x)$  могут быть интерпретированы как индуктивность и емкость линии на единицу длины, рассчитанные по ее геометрическим параметрам. Отличие  $L'$  в середине линии от  $L'_G=(\mu/\pi) \times \ln(2h/a)$  может быть приближенно определено из соотношения  $L'(x)|_{x'=l/2}=L'_G-4(4h^2-a^2)/l^2$ . Оценка отличия  $C'_G=\pi\varepsilon/\ln(2h/a)$  от  $C'$  имеет тот же порядок малости. Таким образом, для  $x \in [2h, l-2h]$ , т.е. для серединных точек линии, при  $l \gg h$  имеем  $L' \rightarrow L'_G$ ,  $C' \rightarrow C'_G$ .

Левая часть уравнений (4) соответствует системе телеграфных уравнений линии с плавно изменяющимися по длине первичными параметрами. Основное отличие уравнений (4) от

(1) заключается в появлении в правой части (4) слагаемых, учитывающих взаимное влияние соседних участков линии. Участки линии, расположенные около неоднородностей (например, около концов линии), находятся в особом положении. Это определяет их особые свойства при излучении энергии электромагнитного поля.

Таким образом, анализ процессов в устройствах с распределенными по одной координате параметрами при различных допущениях может быть сведен к решению уравнений типа телеграфных. Математическая модель анализируемой системы в целом представляется как совокупность устройств, описываемых уравнениями типа телеграфных, и соединяющих (концевых) устройств, описываемых нелинейными схемами замещения.

Для дальнейшего построения математических моделей устройств с распределенными параметрами выполним дискретизацию уравнений (1) и (4) по пространственной координате.

**Дискретизация уравнений.** Выполним дискретизацию уравнений (1) по координате на шаблоне, изображенном на рис. 2, здесь  $d$  — шаг дискретизации (далее — длина участка линии, моделируемого одним звеном схемы замещения). Для многопроводной линии после дискретизации имеем:

$$\left. \begin{aligned} U_1 - U_0 + (z(p)/2)I_0 &= E_0/2; \quad I_1 - I_0 + (y(p)/2)U_1 = 0; \\ &\vdots \\ U_{k+1} - U_k + z(p)I_k &= E_k; \quad I_{k+1} - I_k + y(p)U_k = 0; \\ &\vdots \\ U_{n+1} - U_n + (z(p)/2)I_n &= E_n/2; \quad I_n - I_{n-1} + (y(p)/2)U_n = 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $U_0$ ,  $U_{n+1}$  — векторы напряжения в начале и конце линии,  $\#(p, kd) = \#_k$ ,  $k=0, n+1$ , где  $\# \equiv I, U, E$ ,  $z(p) = Z(p)d$ ,  $y(p) = Y(p)d$ , а  $E_k = E(p, kd)d$  — вектор ЭДС, индуцируемых на  $k$ -м участке линии тангенциальной составляющей вектора напряженности электрического поля.

Для двухпроводной линии уравнения (5) могут интерпретироваться как уравнения Кирхгофа для схемы замещения, образованной  $n$  Т-образными звеньями (рис. 3). Система уравнений (5) имеет блочно-диагональную структуру, что существенно упрощает ее решение.

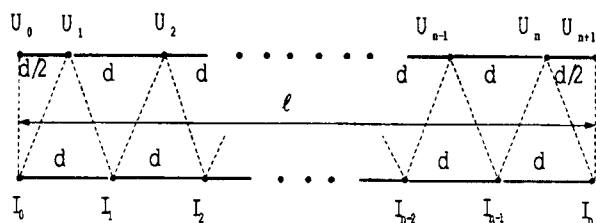


Рис. 2

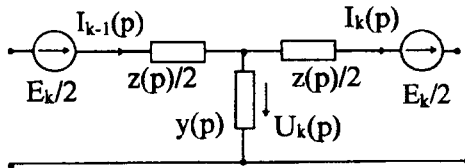


Рис. 3

Дискретизация уравнений (4) на шаблоне, изображенном на рис. 2, порождает следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_1 - U_0 + (L_0/2) p I_0 &= -(\mu d/8\pi) p F_0 + E_0/2; \\ &\vdots \\ U_{k+1} - U_k + L_k p I_k &= -(\mu d/4\pi) p F_k + E_k; \\ &\vdots \\ U_0 - U_n + (L_n/2) p I_n &= -(\mu d/8\pi) p F_n + E_n/2; \\ I_1 - I_0 + C_{1/2} p U_1 &= -[F_1 - F_0 + d(g_{1/2,n} I_n - g_{1/2,0} I_0)]/R_{1/2}; \\ &\vdots \\ I_{k+1} - I_k + \frac{C_{2k-1} p U_k}{2} &= -[F_{k+1} - F_k + \\ &+ d(g_{2k-1,n} I_n - g_{2k-1,0} I_0)]/R_{2k-1}; \\ &\vdots \\ I_n - I_{n-1} + \frac{C_{2n-1} p U_n}{2} &= -[F_n - F_{n-1} + \\ &+ d(g_{2n-1,n} I_n - g_{2n-1,0} I_0)]/R_{2n-1}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $L_k = dL'(x)|_{x=kd}$ ,  $\frac{C_{2k-1}}{2} = dC'(x)|_{x=\frac{2k-1}{2}d}$ ,

которая также может интерпретироваться как уравнения Кирхгофа, записанные для некоторой схемы замещения [5]. Функции  $F_k$ , входящие в правую часть (6), вычисляются интегрированием по всей длине линии. Поэтому система уравнений (6) обладает полностью заполненной матрицей  $M = \{m_{\nu,\nu}\}$ . При  $|v-\nu| > 2$  коэффициенты  $m_{\nu,\nu}$  определяют взаимное влияние  $\nu$ -го и  $v$ -го звеньев схемы замещения. На практике можно принять  $m_{\nu,\nu} = 0$  при  $|v-\nu| > (3 \div 5)$  [5]. Поэтому интегрирование (6) также сводится к обработке блочно-диагональных матриц.

Точность аппроксимации производных, входящих в левую часть (1) и (4), в крайних точках шаблона (рис. 2) имеет порядок  $O(d)$ . В остальных точках шаблона точность аппроксимации  $O^2(d^2)$ . При моделировании эффекта излучения электромагнитной энергии большее значение имеет точность аппроксимации в крайних точках шаблона, поэтому для них следует использовать аппроксимацию производных более высокого порядка [4]:

$$\left. \frac{dU(x,p)}{dx} \right|_{x=0} = \left( \frac{8}{3} (U_1(p) - U_0(p)) - \frac{1}{3} (U_2(p) - U_1(p)) \right) / d + O(d^2).$$

Важным является правильный выбор числа  $n$  звеньев схемы замещения линии. Хорошо за-

рекомендовавшая себя при проведении расчетов оценка числа звеньев, основанная на требовании воспроизведения определяющего спектра частот переходного процесса схемой замещения линии, имеет вид [4]

$$n > 8l/vt_F,$$

где  $v$  — скорость распространения электромагнитной волны;  $t_F$  — длительность фронта воздействующего импульса.

При действии на анализируемую систему кратковременных импульсов электромагнитного поля число звеньев  $n$  может достигать 1000 и более для каждого моделируемого устройства.

Таким образом, анализ процессов в устройствах с распределенными по одной координате параметрами может быть сведен к интегрированию систем обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности или анализу переходных процессов в многозвенных схемах. Рассмотрим далее построение эффективных численных моделей для анализа многозвенных схем.

**Синтетическая схема устройства.** Для построения численных моделей многозвенных схем замещения воспользуемся неявными методами интегрирования. Используемые в этих методах так называемые «дискретные модели» [6] или «синтетические схемы» [1] синтезируют топологию исходной цепи и метод интегрирования описывающих ее уравнений.

При использовании в качестве координатного базиса узловых напряжений синтетические схемы многополюсников представляют собой активно-резистивные многополюсники той же топологии, включающие в себя только проводимости  $G$  и источники тока  $J$ . Выражения для  $G$  и  $J$  определяются видом исходной схемы, параметрами ее элементов и неявным методом интегрирования, выбранным для решения задачи. Синтетическая схема линии будет иметь вид многозвенной схемы, состоящей из  $n$  каскадно соединенных активно-резистивных многополюсников. Исключая внутренние узлы в синтетической схеме линии, получим некоторый  $2s$ -полюсник, где  $s$  — число проводов линии, являющийся численной моделью линии на текущем шаге интегрирования и характеризующийся матрицей эквивалентных проводимостей, и вектором эквивалентных источников тока.

Конкретные алгоритмы расчета эквивалентных проводимостей и источников тока макромоделей линии будут рассмотрены в следующем разделе статьи. Один шаг общего алгоритма решения задачи методом синтетических схем имеет вид:

1.  $t = t_m$ . Вычисление проводимостей элементов синтетической схемы линии.

2. Вычисление источников тока в каждом звене синтетической схемы.

3. Вычисление эквивалентных проводимостей модели линии.

4. Вычисление эквивалентных источников тока модели линии.

5. Объединение моделей всех линий, образующих исследуемую систему, и моделей нагрузок в единую синтетическую схему. Определение граничных напряжений и токов в каждой линии к концу шага интегрирования  $t=t_m+\Delta t$ .

6. Вычисление потенциалов внутренних узлов и токов в звеньях модели линии.

Совокупность алгоритмов, реализующих пункты 1, 2 и 6, будем называть далее макромоделью низшего уровня для синтетической схемы линии; алгоритмы, реализующие пункты 3 и 4, будем называть макромоделью высшего уровня. Наибольшие вычислительные затраты приходятся на блоки 3, 4 и 6, так как получение эквивалентных параметров связано с исключением большого числа внутренних узлов синтетической схемы линии.

Таким образом, численная модель всей анализируемой системы при использовании МСС состоит из активно-резистивных  $2s$ -полусников, являющихся численными моделями устройств с распределенными параметрами, а также  $G$ - $J$  многополюсников, являющихся численными моделями соединяющих устройств и нагрузок. Основные объемы вычислений при обработке численной модели всей системы выполняются в макромоделах высшего и низшего уровней. При анализе быстротекущих процессов в системах, содержащих несколько десятков устройств (элементов устройств) с распределенными параметрами, временные затраты на решение задачи весьма значительны даже при использовании самых современных вычислительных средств. Поэтому далее рассматривается построение эффективных алгоритмов реализации вычисления в макромоделах высшего и низшего уровней для устройств с распределенными параметрами.

**Макромодели линии.** Каждое  $k$ -е звено синтетической схемы однородной многопроводной линии характеризуется матрицей проводимостей  $G$  и вектором источников тока  $J$ :

$$G = \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} \\ G_{2,1} & G_{2,2} \end{bmatrix}; \quad J^{(k)} = \begin{bmatrix} J_1^{(k)} \\ J_2^{(k)} \end{bmatrix}.$$

Матрица проводимостей  $G$  одинакова для всех звеньев и состоит из подматриц  $G_{1,1}$  и  $G_{2,2}$  проводимостей ветвей, подсоединенных к  $s$  «левым» и  $s$  «правым» узлам многополюсного звена,  $s$  — число проводов линии, и подматриц

$G_{1,2}$  and  $G_{2,1}$  проводимостей ветвей, соединяющих «левые» и «правые» узлы многополюсника. Вектор источников тока  $J^{(k)}$  состоит из векторов источников тока  $J_1^{(k)}$ , подсоединенных соответственно к «левым»  $J_2^{(k)}$  и «правым» узлам многополюсника. Для однородной линии с симметричными схемами замещения звеньев имеем:  $G_{1,1}=G_{2,2}$ ,  $G_{1,2}=G_{2,1}$ .

Алгоритм определения эквивалентных параметров является одним из вариантов алгоритма исключения Гаусса для трехдиагональных матриц, элементы которых являются квадратными подматрицами. Для синтетической схемы линии, состоящей из  $n$  звеньев, алгоритм может быть записан в виде следующих рекуррентных соотношений:

$$J_{eq}^{(1)} = J^{(1)}; \quad G_{eq}^{(1)} = G, \quad k = \overline{1, n-1};$$

$$B = (G_{2,2,eq}^{(k)} + G_{1,1})^{-1}; \quad G_{1,1,eq}^{(k+1)} = G_{2,2,eq}^{(k+1)} = G_{2,2} - G_{2,1} B G_{1,2}; \quad (7)$$

$$G_{1,2,eq}^{(k+1)} = G_{2,1,eq}^{(k+1)} = -G_{1,2,eq}^{(k)} B G_{1,2}; \quad (8)$$

$$J_{1,eq}^{(k+1)} = J_{1,eq}^{(k)} - G_{1,2,eq}^{(k)} B (J_{2,eq}^{(k)} + J_1^{(k+1)}); \quad (9)$$

$$J_{2,eq}^{(k+1)} = J_2^{(k)} - G_{2,1} B (J_{2,eq}^{(k)} + J_1^{(k+1)}). \quad (10)$$

Структура матриц  $J_{eq}^{(k)}$  и  $G_{eq}^{(k)}$  аналогична структуре матриц  $J^{(k)}$  и  $G$ . Выполнение на каждом шаге интегрирования расчетов по формулам (7)–(10) при больших значениях  $n$  требует значительных затрат вычислительных ресурсов. Основные свойства рекуррентных соотношений (7) и (8), позволяющие существенно упростить и ускорить их использование, приведены и доказаны в [4]. Важным для построения эффективного алгоритма определения эквивалентных проводимостей синтетической схемы линии (пункт 3 алгоритма) являются следующие теоремы.

**Теорема 1.** Матрица собственных проводимостей  $G_{1,1,eq}^{(k)}$  стабилизируется в процессе вычисления по алгоритму (7) и стремится к значению

$$G_{1,1,eq}^{(\infty)} = G_{1,1} (1 - H^2)^{1/2}; \quad H = G_{1,1}^{-1} G_{1,2}.$$

Имеет место следующая оценка скорости стабилизации [4]:

$$\| G_{1,1}^{-1} (G_{1,1,eq}^{(k)} - G_{1,1,eq}^{(\infty)}) \| \leq 2 \sqrt{1 - \lambda_{\min}^2} \frac{\lambda_{\max}^{2k}}{1 - \lambda_{\max}^{2k}},$$

где  $k=\overline{1, n}$  и  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$  — соответственно минимальное и максимальное собственные значения матрицы  $H$ .

**Теорема 2.** Матрица взаимных проводимостей  $G_{1,2,eq}^{(k)}$  в процессе вычисления по алгоритму (8)

стремится к значению  $G_{1,2,eq}^{(\infty)} = 0$ . Имеет место следующая оценка скорости стремления к нулю [4]:

$$\|G_{1,2}^{-1} G_{1,2,eq}^{(k)}\| \leq \frac{2\sqrt{1-\lambda_{\min}^2}}{\lambda_{\min}} \frac{\lambda_{\max}^2}{1-\lambda_{\max}^{2k}}.$$

Использование предельных значений эквивалентных проводимостей синтетической схемы линии и, что особенно важно, оценок скорости сходимости позволяет при определении эквивалентных проводимостей модели отказаться от выполнения всех  $n$  шагов в рекуррентных соотношениях (7) и (8) и воспользоваться равенством

$$G_{eq} = \text{diag}(G_{1,1,eq}^{(\infty)}, G_{1,2,eq}^{(\infty)}).$$

Вычисление  $G_{1,1,eq}^{(\infty)}$  требует  $Ks^3$  операций, где величина постоянной  $K$  зависит от реализации процедуры вычисления квадратного корня из матрицы, причем длительность вычислений не зависит от числа звеньев цепной синтетической схемы. Вычисление  $G_{eq}$  путем исключения внутренних узлов требует  $(n-1)^3 s^3$  операций и обычно больше  $Ks^3$  уже при  $n > 5$ , в то время как характерные значения  $n = (50 \div 1000)$ .

Источники тока синтетической схемы линии вычисляются на каждом шаге интегрирования (пункт 4 алгоритма). Поэтому ускорение именно этого этапа с помощью формул предельного перехода (теоремы 1 и 2) имеет большое значение. Ускоренный алгоритм вычисления эквивалентных источников тока заключается в последовательной смене стратегий расчета при достижении с заданной точностью эквивалентными проводимостями своих предельных значений.

Расчет токов и напряжений в многопроводной линии (пункт 6 алгоритма) осуществляется на каждом шаге интегрирования в результате решения системы уравнений  $\hat{G} \cdot U = J$  для синтетической схемы. Поскольку данная система решается многократно, то целесообразно выполнить  $LU$ -разложение матрицы  $\hat{G}$ , которое благодаря симметричности  $\hat{G}$  будет иметь вид  $\hat{G} = LL^T$ , где

$$\left. \begin{aligned} L_{1,1} &= \sqrt{2G_{1,1}}; & L_{2,1} &= G_{1,2} \sqrt{(2G_{1,1})^{-1}}; \\ L_{2,2} &= \sqrt{2G_{1,1} - G_{1,2}(2G_{1,1})^{-1}G_{1,2}}; & L_{3,2} &= G_{1,2}L_{2,2}^{-1}; \\ L_{k,k} &= \sqrt{2G_{1,1} - G_{1,2}L_{k-1,k-1}^{-1}G_{1,2}}; \\ L_{k,k-1} &= G_{1,2}L_{k-1,k-1}^{-1}, & k &= 2, n-1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Многократное повышение эффективности выполнения  $LU$ -разложения матрицы  $\hat{G}$  может быть достигнуто при использовании следующей теоремы.

**Теорема 3.** Матрицы  $L_{k,k}$  и  $L_{k+1,k} = G_{1,2} \times L_{k,k}^{-1}$  — элементы матрицы  $L$  в  $LU$ -разложении матрицы узловых проводимостей  $\hat{G}$  синтетиче-

ской схемы — стабилизируются в процессе вычисления по алгоритму (11). Матрица  $L_{k,k}$  стремится к значению  $L_{k,k\infty} = (G_{1,1}(1 + \sqrt{1 - H^2}))^{1/2}$ . Имеет место следующая оценка скорости стабилизации [4]:

$$\|G_{1,1}^{-1}(L_{k,k}^2 - L_{k,k\infty}^2)\| \leq 2\sqrt{1-\lambda_{\min}^2} \frac{\lambda_{\max}^{2k}}{1-\lambda_{\max}^{2k}}.$$

Учитывая последний результат, возможно выполнить лишь 2–5 первых шагов  $LU$ -разложения при общем числе шагов, определяемом количеством звеньев цепной схемы замещения ( $n = 50 \div 1000$ ). Это обстоятельство позволяет не только снизить время расчета волновых процессов в линиях, но и, что не менее важно, не хранить в полном объеме результаты  $LU$ -разложения, а воспользоваться следующими равенствами:

$$L_{ff} = L_{k,k}; \quad L_{ff-1} = L_{k,k-1}; \quad f = \overline{5, n-1}.$$

Особенностью синтетических схем цепей с распределенными параметрами является существенное различие проводимостей продольных  $G_L$  и поперечных  $G_C$  элементов синтетической схемы звена. Указанное свойство для многопроводной линии выражается неравенством  $\|H\| \ll 1$ , а для двухпроводной линии — неравенством  $W = G_L/G_C \ll 1$ . Для двухпроводной линии без потерь имеем  $W = h^2/2L'_G C'_G d^2$ . Выбирая параметры дискретизации  $n$  и  $\Delta t$  в соответствии с требованием воспроизведения определяющего спектра частот переходного процесса схемой замещения линии, получаем  $W < 1/200$ .

Рассмотрим кабель связи с  $\Pi$ -образной схемой замещения участка кабеля (рис. 4) длиной  $d$ . Параметры кабельной линии на единицу длины имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} R_1 &= 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}; & L_1 &= 1,50 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; \\ R_1 &= 1,58 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}; & L_2 &= 1,00 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; \\ M &= 2,00 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/м}; & R_{12} &= 1,00 \cdot 10^{10} \text{ Ом/м}; \\ C_{12} &= 24,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}; & R_{23} &= 5,40 \cdot 10^3 \text{ Ом/м}. \end{aligned}$$

На рис. 5 приведены графики зависимости  $\|G_{1,1}^{-1}(G_{1,1,eq}^{(k)} - G_{1,1,eq}^{(\infty)})\|$  и  $\|G_{1,2}^{-1} G_{1,2,eq}^{(k)}\|$  от числа звеньев  $k$  для рассматриваемого кабеля связи. Значение  $G_{1,1,eq}^{(k)}$  рассчитывается по алгоритму

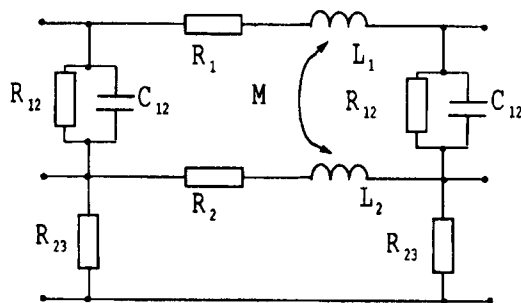


Рис. 4

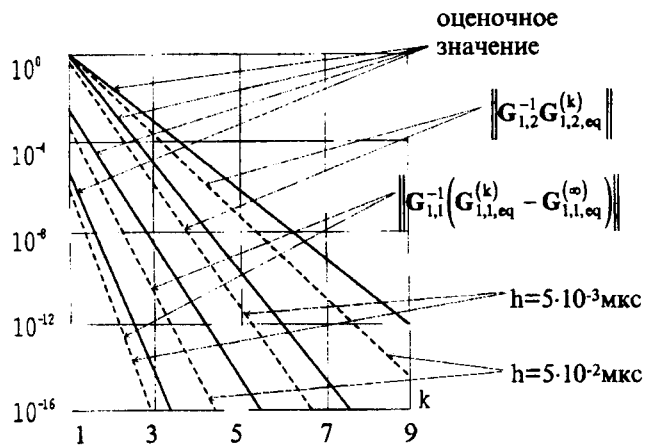


Рис. 5

(7), а  $G_{1,2,eq}^{(k)}$  — по алгоритму (8). На рис. 5 изображены также графики, соответствующие оценкам скорости сходимости эквивалентных проводимостей синтетической схемы (теоремы 1 и 2) к своим предельным значениям. Из графиков видно, что полученные оценки скорости сходимости являются мажорантными и дают достаточно точное представление о скорости сходимости при всех значениях номера  $k$  звена. Эти оценки решают проблему практической реализации предлагаемого алгоритма вычисления источников тока синтетической схемы линии. С помощью этих оценок можно определить число звеньев, обеспечивающих заданную точность воспроизведения  $G$ -параметров с помощью предельных значений.

Вычисленные на основании мажорантных оценок значения используются в дальнейшем при вычислении эквивалентных  $G$ - $J$  параметров макромоделей высшего уровня линии и при выполнении  $LU$ -разложения, позволяя добиться фактической независимости скорости выполнения этих вычислительных процедур от числа звеньев схемы замещения линии.

При уменьшении шага интегрирования увеличивается скорость сходимости матриц к своим предельным значениям, следовательно, уменьшаются значения  $k$  объединяемых звеньев, начиная с которого эквивалентные проводимости с заданной точностью совпадают с предельными значениями проводимостей модели.

Для двухпроводной модели скорость сходимости определяется параметром  $W \sim \Delta t^2$ . Чем меньше  $W$ , тем быстрее сходятся к своим предельным значениям матрицы эквивалентных параметров линий и элементы  $LU$ -разложения. Проведенные исследования показали, что аналогичная зависимость от шага интегрирования имеет место и для многопроводных моделей. Таким образом, уменьшение шага интегриро-

вания при определенных соотношениях между фронтом импульса и его длительностью может оказаться в целом выгодным для сокращения времени расчета, так как позволяет использовать более эффективные алгоритмы.

Учет зависимости параметров устройств от частоты при неизменном значении шага интегрирования приводит к уменьшению  $W$  примерно на 10%, а следовательно, к уменьшению нормы  $\|H\| = W/(1+W)$ . На рис. 6 изображены зависимости собственных и взаимных проводимостей синтетической схемы от  $k$  объединяемых звеньев. Схема замещения устройства построена с учетом и без учета зависимости параметров от частоты. Анализ этих зависимостей показывает, что учет частотной зависимости увеличивает скорость стабилизации параметров синтетической схемы.

Введение взаимных индуктивностей в схему замещения устройства при неизменности всех остальных параметров уменьшает  $\|H\|$  и, следовательно, усиливает эффект стабилизации. Это свойство показано на примере упрощенной схемы замещения трехфазной транспонированной линии электропередачи с параметрами, не зависящими от частоты (рис. 7).

Таким образом, использование предложенных в настоящей работе теорем позволяет значительно повысить эффективность расчетов переходных

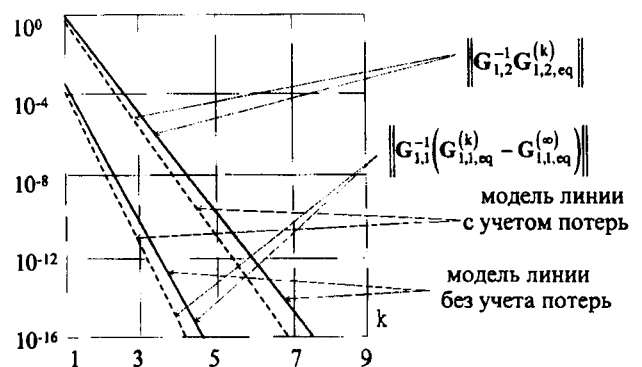


Рис. 6

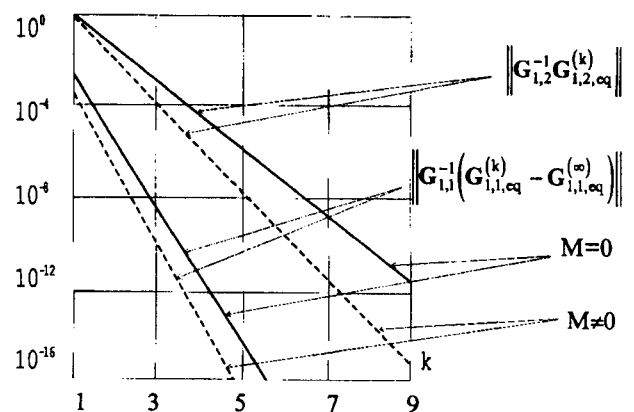


Рис. 7

процессов в системах с распределенными параметрами. Благодаря использованию эффекта стабилизации матриц эквивалентных параметров синтетических схем распределенных устройств объемы вычислений, выполняемых в макромоделах высшего и низшего уровней, фактически, не зависят от числа звеньев в синтетической схеме, использующейся как численная модель устройств.

**Синтетические схемы для моделирования частотной зависимости эквивалентных параметров устройств.** Элементы многозвенных схем замещения  $z(j\omega)$  и  $y(j\omega)$  моделируют частотную зависимость эквивалентных параметров устройств с распределенными параметрами. В предыдущем разделе статьи предполагалось, что синтетические схемы, воспроизводящие  $z(j\omega)$  и  $y(j\omega)$ , могут быть построены. В этом разделе рассмотрены два подхода к построению таких синтетических схем.

В целом ряде практических задач частотные характеристики описываются монотонными функциями в широком диапазоне частот, как например, в задаче «провод над землей», рассмотренной в начале статьи. В этих случаях целесообразно строить синтетическую схему частотно зависимого элемента по специально синтезированной схеме замещения. Параметры этой схемы замещения определяются из решения следующей задачи:

$$\int_{\omega_l}^{\omega_u} (|Y(j\omega, P)| - |Y(j\omega)|)^2 d\omega \rightarrow \min. \quad (12)$$

$P \in B$

Здесь  $P$  — вектор варьируемых параметров схемы замещения;  $B$  — область ограничений на величины компонент вектора  $P$ ;  $|Y(j\omega, P)|$  — частотная характеристика синтезируемой схемы замещения;  $|Y(j\omega)|$  — эталонная частотная характеристика.

Частотная характеристика синтезируемой схемы замещения имеет вид отношения двух полиномов от  $j\omega$ . Поэтому задача (12) обладает достаточно плохими численными свойствами. Действенным средством повышения эффективности ее решения являются сужение области  $B$  поиска минимума и введение ограничения на величину максимально допустимого отклонения фазочастотной характеристики схемы замещения от эталонной фазочастотной характеристики:

$$\max_{\omega \in (\omega_l, \omega_u)} (\arg Y(j\omega, P) - \arg Y(j\omega)) < \sigma.$$

Опыт расчетов показывает, что величину  $\sigma$  можно принять равной  $(1 \div 5)$  град. В область  $B$  ограничений на величины компонент вектора  $P$  необходимо вводить ограничения на макси-

мальное и минимальное значения каждой компоненты, на максимальное отклонение от начальных условий, на соотношения между однотипными параметрами, а также ограничения физической реализуемости. Среди последних отметим ограничение, следующее из предельно возможной скорости распространения электромагнитной волны по распределенной системе. Для большинства систем эта скорость принимается равной скорости света или определяется дополнительно (аналитически или экспериментально).

Введение ограничений существенно усложняет алгоритм решения задачи нелинейного программирования (12). Тем не менее, постановка задачи с ограничениями является более продуктивной, поскольку обеспечивает лучшие качественные показатели решения, лучшую сходимость процесса поиска экстремума, при одновременных гарантиях физичности решения.

После решения задачи синтеза параметров схемы замещения построение соответствующей ей синтетической схемы не представляет проблем [6].

Если частотные характеристики распределенных устройств не обладают свойством монотонности, то выбор структуры схемы замещения весьма сложен. Поэтому рассмотрим иной способ построения синтетической схемы элемента, имеющего произвольную зависимость входной полной проводимости от частоты. Численная модель описывается традиционным для МСС образом:

$$i_{N+1} = G u_{N+1} + J_N,$$

где ток  $i$  и напряжение  $u$  на элементе при  $t=t_{N+1}$ ;  $G$  и  $J_N$  — параметры модели, имеющие смысл проводимости и источника тока и зависящие от шага интегрирования  $\Delta t$ ,  $J_N$  зависит также от предыстории процесса. Если известна частотная характеристика  $Y(j\omega) = 1/Z(j\omega)$ , то последнее соотношение можно сопоставить с интегральным уравнением:

$$\begin{aligned} i_{N+1} = & \frac{2u_{N+1}}{\pi} \int_0^\infty y_R(\omega) \left( \frac{\sin(\omega t)}{\omega} + \frac{\Delta t}{2} \cos(\omega t) \right) d\omega \Big|_{t=0} + \\ & + \frac{\Delta t u_N}{\pi} \int_0^\infty y_R(\omega) \cos(\omega t) d\omega \Big|_{t=\Delta t} + \\ & + \frac{2}{\pi} \int_0^{N\Delta t} u(x) \int_0^\infty y_R(\omega) \cos(\omega t_{N+1} - x) d\omega dx; \\ y_R(\omega) = & \operatorname{Re}(Y(j\omega)). \end{aligned} \quad (13)$$

Коэффициент при  $u_{N+1}$  можно рассматривать как  $G$ , а остальные слагаемые — как  $J_N$  синтетической схемы элемента. Интегралы, входящие в (13), могут быть рассчитаны, если фун-

кция  $y_R(\omega)$  задана в виде ряда точек  $(\omega_i, y_R(\omega_i))$   $i=0, S+1$  (полученных, например, экспериментально) и для ее аппроксимации используется кусочно-линейный оператор [7, 8, 9]:

$$y_R(\omega) = a_0 + \beta_0 \omega + \sum_{\gamma=1}^S \beta_\gamma |\omega - \omega_\gamma|.$$

Здесь  $b_0, \beta_\gamma, \gamma=1, S$  — параметры кусочно-линейного оператора и  $S$  — число точек. Если экспериментально определена только амплитудная характеристика  $A(\omega)$ , например,  $A(\omega) = \ln(|Y(j\omega)/Y(j\omega_0)|)$ ,  $\omega_0 = \text{const}$  то, представляя  $A(\omega)$  в виде кусочно-линейного оператора

$$A(\omega) = a_0 + \alpha_0 \omega + \sum_{\gamma=1}^S \alpha_\gamma |\omega - \omega_\gamma|$$

и рассчитывая далее фазочастотную характеристику  $B(\omega)$ :

$$B(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dA}{du} \ln \frac{u + \omega}{|u - \omega|} du =$$

$$= \frac{2\omega}{\pi} \left( \sum_{\gamma=1}^S a_\gamma \ln \frac{(\omega - \omega_\gamma)|\omega - \omega_\gamma|}{\omega^2} + \sum_{\gamma=1}^S \frac{a_\gamma \omega_\gamma}{\omega} \ln \frac{\omega + \omega_\gamma}{|\omega - \omega_\gamma|} \right),$$

при условии  $\sum_{\gamma=1}^S a_\gamma = 0$ ,  $\left. \frac{dA(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_S} = 0$  получим

зависимость  $y_R(\omega)$ . Аналогичные соотношения могут быть получены, если экспериментально определена только фазочастотная характеристика. Таким образом, для определения  $y_R(\omega)$  достаточно иметь экспериментальное или аналитическое описание амплитудной или фазовой частотой характеристик. Последнее обстоятельство значительно упрощает получение экспериментальных результатов в широком диапазоне частот.

В результате подстановки выражения для  $y_R(\omega)$  в (13) получим после ряда преобразований [7, 8] выражение для проводимости  $G$  синтетической схемы —

$$G = y_R(\omega_S) + \Delta t \sum_{\gamma=1}^S \beta_\gamma \omega_\gamma^2,$$

и рекуррентные соотношения для источника тока:

$$J_N = \frac{\Delta t}{\pi} \left( u_N \int_0^\infty y_R(\omega) \cos(\omega t) d\omega \Big|_{t=h} + u_{N-1} \int_0^\infty y_R(\omega) \cos(\omega t) d\omega \Big|_{t=2\Delta t} \right) -$$

$$- \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{k=p} \Phi_k e^{\delta_k \Delta t} \sum_{\gamma=1}^S C_{N-1}^{(k,\gamma)} \beta_\gamma \cos(\omega_\gamma (N+1) \Delta t) -$$

$$- \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{k=p} \Phi_k e^{\delta_k \Delta t} \sum_{\gamma=1}^S S_{N-1}^{(k,\gamma)} \beta_\gamma \sin(\omega_\gamma (N+1) \Delta t) -$$

$$- \frac{4}{\pi} \beta_0 \sum_{k=1}^{k=p} \Phi_k e^{2\delta_k \Delta t} B_{N-1}^{(k)};$$

$$C_N^{(k,\gamma)} = C_{N-1}^{(k,\gamma)} e^{\delta_k \Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (u_N \cos(\omega_\gamma (N+1) \Delta t) + u_{N-1} e^{\delta_k \Delta t} \cos(\omega_\gamma N \Delta t));$$

$$S_N^{(k,\gamma)} = S_{N-1}^{(k,\gamma)} e^{\delta_k \Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (u_N \sin(\omega_\gamma (N+1) \Delta t) + u_{N-1} e^{\delta_k \Delta t} \sin(\omega_\gamma N \Delta t));$$

$$B_N^{(k)} = B_{N-1}^{(k)} e^{\delta_k \Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (u_N + u_{N-1} e^{\delta_k \Delta t});$$

$$\Phi_k, \delta_k: \left\{ \frac{1}{t^2} \cong \sum_{k=1}^{k=\tau} \Phi_k e^{\delta_k \Delta t}, \tau=10 \right\}.$$

Значения коэффициентов  $\Phi_k, \delta_k$  получены в [7]. Ошибка  $\Delta y(t)$  воспроизведения переходной проводимости  $y(t)$ , если ошибка  $\varepsilon(\omega)$  в частотной характеристике  $y_R(\omega)$  составляет, может быть оценена следующим образом:

$$\Delta y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\varepsilon(\omega)}{\omega} y_R(\omega) \sin(\omega t) d\omega \leq$$

$$\leq \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \varepsilon_{\max} \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega \leq \max_{\omega \in (0, \omega_S)} |\varepsilon(\omega)|.$$

Таким образом, синтетическая схема устройства с произвольной частотной характеристикой построена.

**Заключение.** Основные преимущества предлагаемой методики заключаются в следующем: эффективный расчет во временной области переходных процессов в системах с распределенными параметрами;

возможность учитывать реальные частотные характеристики и нелинейные свойства устройств.

Эти преимущества определяют область применения методики:

задачи анализа влияния внешних и внутренних электромагнитных импульсов на энергетические (воздушные и кабельные) системы и системы связи с учетом нелинейных защитных устройств;

задачи расчета процессов в энергетических и электромагнитных защитных системах, установленных на самолетах и кораблях при воздействии ЭМИ с учетом реальных частотных свойств, моделируемых длинными линиями.

**Выводы.** Предложена методика решения задач анализа процессов в системах, включающих устройства с распределенными по пространственной координате параметрами, возникающих при действии внешнего импульсного электромагнитного поля. Рассмотрены методы построения математических моделей устройств с распределенными параметрами в виде многосвязных схем замещения, предложены различные подходы к определению параметров этих схем, позволяющие учитывать реальные частотные зависимости эквивалентных параметров устройств. В качестве численного метода анализа процессов в распределенных системах используется метод синтетических схем. Предложены методы формирования и выявлены численные особенности синтетических схем анализируемых устройств. Доказаны теоремы, позволившие существенно повысить эффективность решения задачи анализа импульсных процессов в распределенных системах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы численного моделирования процессов в электрических цепях / Демирчян К.С., Ракитский Ю.В., Бутырин П.А. и др. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1982, № 2.
2. Гринберг Г.А., Бонштедт Б.И. Основы точной теории волнового поля линий передачи. — ЖТФ, 1954, т. XXIV, вып. 1.
3. Ianoz M.V., Rachidi F., Tkachenko S.V. Electromagnetic field coupling to a line of finite length: theory and fast iterative solution in frequency and time domains. — IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1995, vol. 37, № 4.
4. Коровкин Н.В., Селина Е.Е. Моделирование волновых процессов в распределенных электромагнитных системах. —

Изд-во СПбГТУ, 1992.

5. Finite length line model for the analysis of electromagnetic processes with regard to a radiation / Vodopianov G.V., Ianoz M.V., Korovkin N.V. и др. — EMC'98 Roma, 1998, vol. 2.

6. Чуа Л.О., Пен Мин Лин. Машинный анализ электронных схем. — М.: Энергия, 1980.

7. Korovkin N.V. The use of experimental frequency responses for transients calculation in the EMC non-linear problems. — EMC'96 Roma, 1996, vol. 2.

8. Korovkin N.V., Minevich T.G., Selina E.E. Calculation of transients in non-linear systems, consisting of elements described by their frequency responses. — EMC'97, Zurich, 1997.

9. Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Заборовский В.С. Вычислительные методы синтеза схемы автоматического управления. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.

[24.09.98]

**Авторы:** Коровкин Николай Владимирович в 1977 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) по специальности «Инженерная электрофизика». В 1997 г. защитил докторскую диссертацию «Построение синтетических схем для численного анализа электромагнитных процессов, описываемых жесткими уравнениями». Профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ).

**Селина Екатерина Евгеньевна** в 1977 г. окончила электромеханический факультет ЛПИ по специальности «Инженерная электрофизика». В 1986 г. защитила кандидатскую диссертацию «Использование метода синтетических схем для анализа переходных процессов в цепях с распределенными параметрами». Доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» электромеханического факультета СПбГТУ.

## Из истории электротехники

*В этой рубрике редакция периодически помещает воспоминания известных российских ученых-электротехников о некоторых событиях в истории науки, свидетелями которых они были. В публикуемой ниже статье академик АЭН, проф. Ю.М. Пятин вспоминает о диспуте, посвященном природе электрического тока, между В.Ф. Миткевичем и Я.И. Френкелем и о той роли, которую сыграл автор статьи в критике концепции Фарадея.*

### Диспут о природе электрического тока

Это было 70 лет назад, весной 1929 г. в Московском энергетическом институте, студентом которого я тогда был. В диспуте, кроме Миткевича и Френкеля, участвовали профессор МЭИ и МГУ, а в роли слушателей были студенты старших курсов МЭИ. Сначала выступил Миткевич, затем Френкель, потом профессора. Выступления чередовались вопросами с мест и ответами. Завершался диспут выступлением высокопоставленного партийного наблюдателя. Вопросов ему не задавали.

Миткевич был сторонником концепции Фарадея, а Френкель — Максвелла. Миткевич обстоятельно изложил сделанное им развитие концепции Фарадея в области структуры магнитного и электрического полей, подчеркнув, в частности, что магнитное поле постоянного магнита состоит из конечного числа магнитных линий, имеющих вихревую структуру и что изолированная кольцевая магнитная линия должна стягиваться до предела, достигнув которого превращается в электрон.

Френкель доклада не делал. Все его выступление свелось к критике концепции Фарадея и ее дальнейшего развития Миткевичем, а также к множеству вопросов, на которые Миткевич тут же отвечал и, в свою очередь, задавал вопросы Френкелю. В аудитории царил обстановка корректной научной беседы без привлечения модной тогда политики. Лишь один раз, когда Френкель заявил, что вопрос, заданный Миткевичем, похож на вопрос о цвете меридиана. Миткевич с негодованием ответил, что его меридиан красного цвета, а какого цвета меридиан Френкеля, он не знает.

Без политики диспут все же не обошелся, ибо в заключение диспута слово было представлено молчавшему до тех пор партийному наблюдателю. Он обрушился на всех выступивших и даже на «красного» Миткевича с обвинением в протаскивании идеализма и пренебрежении к основам марксизма, причем в такой резкой форме, что у участников диспута были серьезные основания опасаться служебных неприятностей.

Диспут не оправдал возлагавшихся на него надежд. Ни одна из концепций не победила. Все осталось при своем мнении. Даже мне, студенту третьего курса, было ясно, что в этом споре истина не родилась, потому что не был найден решающий эксперимент, подтверждающий только одну концепцию и противоречащий другой. Но взять слово я не мог, равно как и обратиться к Миткевичу или Френкелю. Однако судьба решила иначе. Через год я совершенно неожиданно оказался студентом пятого курса Ленинградского политехнического института, часто беседовал с Миткевичем и даже бывал у него дома.

О том, как и почему студента четвертого курса

МЭИ вдруг переводят на пятый курс ЛПИ, следует рассказать особо, ибо такие метаморфозы могли происходить лишь в неповторимых условиях появления номенклатуры в конце 20-х годов, когда критерий деловой пригодности человека стал подменяться его политическими взглядами. В это время партией была командирована в вузы тысяча партийных работников, проявивших организаторские способности, но не справлявшихся с руководством предприятиями из-за отсутствия знаний. Парттысячники были зачислены без вступительных экзаменов, пользовались поддержкой администрации и заняли руководящее положение в партийной и профсоюзной организациях института. Среди остального студенчества они чувствовали себя хозяевами и запросто отчисляли из института тех студентов, чье социальное происхождение было сомнительным или преданность делу коммунизма которых, на их взгляд, была недостаточной.

На свою беду я проявил такие успехи в науках, что декан, даже не посоветовавшись с парттысячниками, зачислил меня, студента четвертого курса, на должность ассистента МЭИ и поручил читать студентам второго курса лекции по теоретической механике. Произошло это так. Изучая только что вышедший учебник «Соппротивление материалов» профессора Добровольского (он заведовал кафедрой МЭИ), я неожиданно обнаружил пять математических ошибок и соответственно пять ошибочных словесных выводов из этих формул. Предполагая, что ошибаюсь я, а не автор, я обратился к нему с просьбой помочь найти мои ошибки. Но оказалось, что прав я, а не он. Мое «открытие» так поразило профессора, что он посоветовал декану зачислить меня в штат. Я успешно провел курс лекций, был счастлив, как вдруг, случайно услышал разговор двух парттысячников: «Профессора — классово чуждые нам люди. Они готовят смену из таких же классово чуждых людей. Пятина они выбрали потому, что он, сын учителя, тоже классово чуждый».

Быть отчисленным из МЭИ и выселенным из общежития как классово чуждый элемент означало для меня, иногороднего, полную катастрофу. Спасением мог быть только перевод в другой вуз. Поэтому я немедленно обратился в Наркомат с письменной просьбой перевести меня на пятый курс Ленинградского политехнического института (ЛПИ), мотивируя это желанием изучать электромашины специального типа. Моя просьба была удовлетворена без бюрократизма, поскольку я просил перевести меня из Москвы в провинцию. С глаз долой — из сердца вон. Меня оставили в покое и ограничились только тем, что среди студентов нашей группы обнаружили и отчислили четырех чуждых. По счастью, они были

москвичами и, испытав страшную нервотрепку, восстановились в МЭИ через пару лет.

В ЛПИ я ходил на лекции Миткевича (он читал на младших курсах) и, познакомившись с Владимиром Федоровичем в 1931 г., много раз беседовал с ним по поводу решающего эксперимента. Но придумать его нам тогда не удалось. Зато общение с крупным ученым придало мне уверенность в своих силах, а судьба преподнесла новый, но уже приятный сюрприз. Наркомат потребовал направить меня по окончании ЛПИ в Москву в распоряжение Всесоюзного объединения точной индустрии (ВОТИ). Произошло это так. ВОТИ объявил в газетах конкурс на проект бытового тепломера. Меня это заинтересовало, и я придумал очень компактный прибор, легко и незаметно монтируемый на батарее отопления компат. Институтское Бюро реализации изобретений (БРИЗ) помогло мне изготовить альбом чертежей и командировало в Москву на конкурс. Мой проект понравился главному инженеру ВОТИ Гринману, и он предложил мне по окончании ЛПИ поступить на работу в Научный институт ВОТИ. Я с радостью согласился, поблагодарил за оказанную честь, но сказал, что имеется непреодолимая преграда: я распределен на работу в Харьков. Гринман улыбнулся, позвонил в Наркомат и попросил направить меня не в Харьков, а в распоряжение ВОТИ. Произошло это так легко и быстро, что я отказался верить своему счастью.

Вскоре по возвращению из командировки меня вызвали в Комитет комсомола, где задали странный вопрос: кто из моих родственников живет в Москве? Я ответил, что у меня в Москве нет родственников. «Зачем ты врешь, — сказали мне. — Из Наркомата пришло распоряжение распределить тебя в Москву, а мы не можем направить туда даже парттысячников». Я ответил, что в Москву на конкурс командировал меня БРИЗ ЛПИ, что мой проект понравился и меня пригласили работать в Научном институте ВОТИ. Меня отпустили, пообещав все проверить.

Однако, помня о могуществе парттысячников, я решил повторить свой маневр и исчезнуть из ЛПИ после сдачи всех экзаменов. Декану я свое нежелание защитить дипломный проект объяснил бесполезностью диплома электромашиностроителя для человека, начинающего работать в области приборостроения. Спорить со мной не стали, выдали справку о сдаче экзаменов и направлении в распоряжении ВОТИ. Все же диплом я в ЛПИ защитил, но только не диплом инженера, а диплом доктора технических наук. Инженерный диплом потребовался мне только один раз в жизни при обстоятельствах, про которые говорят: нарочно не придумаешь. При получении аттестата профессора в Московском авиационном институте чиновники МАИ потребовали от меня копию диплома инженера, а узнав, что у меня такого диплома нет, отказались посылать документы в ВАК. Мое замечание о том, что диплом доктора наук дает мне право быть профессором, не возымело действия. Тогда я предложил запросить ВАК, а когда оттуда позвонили ректору и попросили «пустяками их не обременять», чиновники получили нагоняй.

Владимир Федорович Миткевич переехал в Москву в 1938 г., но наш научный контакт состоялся только после войны, помешавшей мне вовремя за-

щитить кандидатскую диссертацию. Поэтому поиски решающего эксперимента я продолжил только после войны, и в 1948 г. моя работа увенчалась успехом.

Основной причиной нашей с Миткевичем неудачи было то, что мы считали магнитное поле способным проникать в любой проводник, включая и сверхпроводящий (эффект Мейснера был открыт только в 1933 г.). В своих более поздних работах Миткевич, рассматривая случай, когда постоянный магнит вынимают из охватывающего его сверхпроводящего кольца, объяснил возбуждение тока искривлением магнитных линий вблизи поверхности сверхпроводника вплоть до образования и отпочкования замкнутой магнитной линии, охватывающей сверхпроводник. А это означает, что в сверхпроводнике индуцирован электрический ток конечного значения, при котором магнитный поток сверхпроводящего кольца равен магнитному потоку вынутого магнита.

Внимательно изучая это объяснение процесса индуцирования электрического тока в сверхпроводнике, я заметил одно слабое место: если сверхпроводящее кольцо не замкнуто (имеет разрыв), то процесс искривления магнитных линий у поверхности должен сохраняться, и кольцевые магнитные линии должны охватывать сверхпроводник, но это уже не будет означать, что по незамкнутому кольцу проходит электрический ток. Следовательно, в объяснении процесса возникает противоречие, которое нельзя устранить ссылкой на влияние электрического поля, так как внутри сверхпроводника оно не действует. Остается предположить, что весь поток магнита «выскальзывает» через разрыв сверхпроводящего кольца. Отсюда следует, что в решающем эксперименте сверхпроводящее кольцо не должно иметь разрыва, т.е. оно должно быть механически замкнутым и в то же время электрически разомкнутым.

Таким, казалось бы, взаимоисключающим требованиям полностью отвечает замкнутое кольцо в виде цепочки из сверхпроводящих электрически изолированных звеньев. Но, поскольку механизм образования магнитных линий вокруг сплошного и цепочечного сверхпроводниковых колец одинаков, получается, что после удаления постоянного магнита и у цепочечного кольца должен сохраниться магнитный поток, что явно не соответствует действительности.

Можно представить и другой механизм пересечения сверхпроводника магнитной линией, имеющей вихревую структуру. Она может разорваться и, подобно воздушному смерчу, скользнуть по поверхности сверхпроводника, не наводя в нем электрического тока. Но тогда окажется, что ток не возникает и в сплошном кольце, что также не соответствует действительности.

Решающий эксперимент, результаты которого вполне предсказуемы, был найден мною в 1948 г. С Владимиром Федоровичем мы встретились у него дома. Он согласился с тем, что мною нанесен смертельный удар по концепции Фарадея и дружески пожурил за то, что я все еще не доктор наук.

*Пятин Ю.М., академик АЭН РФ, проф.*

## Станислав Вячеславович Хватов

*(К 60-летию со дня рождения)*

Исполнилось 60 лет со дня рождения заведующего кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Нижегородского государственного технического университета, заслуженного деятеля науки и техники РФ, члена-корреспондента российской Академии электротехнических наук, доктора технических наук, профессора Станислава Вячеславовича Хватова.

С.В. Хватов родился в Дзержинске Горьковской (ныне Нижегородской) области в семье служащего. В 1960 г. с отличием окончил электротехнический факультет Горьковского политехнического института, после окончания которого был оставлен на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в должности ассистента, одновременно был принят в заочную аспирантуру кафедры. В дальнейшем трудовая деятельность С.В. Хватова связана с этой кафедрой и электротехническим факультетом.

В 1967 г. он защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Асинхронный нагрузочный генератор с тиристорным преобразователем в цепи ротора», а в 1975 г. — докторскую диссертацию «Вопросы теории и расчета асинхронных вентильных каскадов».

В настоящее время доктор технических наук, профессор С.В. Хватов является одним из ведущих ученых России по каскадным электроприводам. Им создано научное направление по асинхронным вентильным



электроприводам, под его руководством и при непосредственном участии были разработаны и внедрены в серийное производство асинхронные нагрузочные устройства для испытания автотракторных двигателей, подготовлено серийное производство преобразователей для систем АВК, опубликовано около 200 научных статей и несколько монографий по вопросам регулируемого асинхронного электропривода. Более 30 аспирантов, руководителем которых был С.В. Хватов, успешно защитили кандидатские диссертации.

Научная и педагогическая деятельность С.В. Хватова отмечена присуждением звания «Заслуженный деятель науки и техники России» (1989 г.), избранием членом-корреспондентом Академии электротехнических наук РФ (1993 г.), награждением орденом «Знак Почета» и нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования России» (1992 г.).

Плодотворная научная дея-

тельность С.В. Хватова во многом способствовала открытию в НГТУ специализированного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций, председателем которого он является. Спецсовет приобрел широкую известность, в нем рассматриваются диссертационные работы ученых России, а также стран ближнего и дальнего зарубежья.

С.В. Хватов успешно сочетает научную и педагогическую деятельность. Как заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», декан факультета автоматики и электромеханики, он много сил отдает организации учебного и воспитательного процесса. При его активном участии на факультете открываются новые специальности, осуществляется переход на многоуровневую подготовку молодых специалистов.

С.В. Хватов хорошо известен научно-педагогическим работникам вузов страны своим участием в работе методических комиссий, межвузовских координационных советов. Он является ответственным редактором межвузовских сборников научных трудов «Электрооборудование промышленных предприятий» и «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Юбилей Станислав Вячеславович встречает полным сил и энергии. Ученики и коллеги желают ему крепкого здоровья, дальнейших творческих успехов в научной и педагогической деятельности.

Зарубежные читатели могут оформить подписку на наш журнал через следующие фирмы:

#### Albania

Botimpex  
Publications Import—Export  
Agency  
Rr. «Naim Frasheri»  
P.84  
Sh.2 Ap.37  
Tirana  
Tel./Fax: 26886

#### Australia

C.B.D. Library and  
Subscriptions Service  
P.O. Box 255  
Plympton  
South Australia 5038  
Fax: 82938 150

Centre for Russian and  
Euro-Asian Studies  
135, Barry street  
Carlton, Vic. 3052  
Tel.: 344-5956  
Fax: 344-5590

Cordon and Gotch Ltd.  
Private bag 290  
Burwood Vic. 3125  
Tel.: 805-1650  
Fax: 808-0437

Eastern Europe Trading  
Company  
136 Balacava Road  
Caulfield North Victoria 3161  
Melbourne

#### Azerbajdzhan

Firma «Yurd»  
37001 Baku,  
Niyazi, 11  
Tel.: 92-89-57  
Fax: 92-91-55

#### Беларусь

220004 Минск,  
ул. Короля, 16  
Изд-во «Красико-Принт»  
Тел.: 20-55-54  
Факс: 20-26-14

#### Belgique

Librairie du Monde Entier  
110, BLD.H.Max  
B-1000, Bruxelles  
Fax: 223-2652

#### Brasil

Livraria V.Rozov  
Rua 24 de Maio, 35  
3 Andar, cj. 312  
Сер. 01041 São Paulo  
Fax: 578-2074

#### България

«Hemus» Books & Press  
1000 София  
Иъ «Raiko Daskalov Square»  
Fax: 88-34-19

«Razprostranenie na petchata»  
1202 София  
Klokotnitsa, 2A  
Fax: 31-60-37

#### Canada

Troyka Limited  
799 College Street  
Toronto, Ontario  
Canada M6G 1C7  
Tel.: 535-6693  
Fax: 535-3265

#### China

China National Publications  
Import-Export Corp.

P.O. box 88, 16 Congthi E.Road  
Chaoyang District, Beijing  
100704, PRC  
Fax: 506-3101

#### Croatia

Tamaris  
Book Imported and  
Subscription Agent  
Petrinjska, 11  
41000 Zagreb

#### Česká Republika

«První Novinova Společnost A.S.»  
Hvozdska, 5-7  
14831 Praha 4  
Fax: 793-4607

#### Danmark

Arnold Busck  
International Boghandel A/S  
49 Kobmagergade  
DK-1150 København K  
Tel.: 12-24-53  
Fax: 93-04-34

#### MUNKSGAARD

Subscription Service  
35 Norre Sogade  
P.O. Box 2148  
DK-1016 København K  
Tel.: 12-8570  
Fax: 12-9387

G.E.C.GAD Stakbogladden  
Slavic Department  
NDR. Ringgade 3  
DK-8000 Aarhus C  
Tel.: 12-8844  
Fax: 20-9102

#### RHODOS

International  
Subscription Agency  
Niels Brocks Gard  
36 Strandgade  
DK-1401 København K  
Tel.: 54-3060  
Fax: 96-2245

Slavisk Boghandel  
5 Christian IXs Gade  
DK-1111 København K  
Tel.: 31-3826  
Fax: 11-3826

#### Eesti

eesti Ajakirjanduslevi  
Tuukri Poik 6, EE 0102  
Tallinn  
Tel.: 42-6065  
Fax: 42-93-46

#### England

Dawson UK Ltd.  
Cannon House, Park Farm Road  
Folkestone  
Kent CT 19 5EE  
Tel.: 85-0101  
Fax: 85-0440

W.H.Everett and Son Ltd.  
8 Hurlingham Business Park  
Sullivan Road  
London SW6 3DU  
Tel.: 731-8562  
Fax: 371-5870

B.H.Blackwell Ltd.  
Periodicals Division  
P.O. Box 40  
Hythe Bridge Street  
Oxford  
England OX1 2EU  
Tel.: 79-2792  
Fax: 79-1438

Nordic Subscription  
Consultants

Foreign readers can take a subscription to our magazine through the following companies:

P.O. Box 2029  
Sturminster Newton  
Dorset DT 10 1YE  
Tel.: 82-1114  
Fax: 82-1115  
Thornton's of Oxford Ltd.  
11 Broad Street  
Oxford OX1 3AR  
Tel.: 24-2939  
Fax: 20-4021

Slavonic Acquisitions  
The British Library  
Document Supply Centre  
Boston SPA  
Wetherby  
West Yorkshire  
Ls 23 7BQ

#### España

Libreria Rubinos  
Alcala 98  
Madrid 28009  
Tel.: 435-2239  
Fax: 575-3272

#### France

«MK Librairie du Globe»  
2 Rue de Buci  
75006 - Paris  
Fax: 43 25 50 55

Dawson France  
Rue de la Prairie  
B.P.57  
91871 Palaiseau Cedex  
Tel.: 69 10 47 00  
Fax: 64 54 83 26

«Lavoisier Abonnement»  
14 Rue de Provigny  
94236 Cachan Cedex

#### Deutschland

Lange & Springer  
Wissenschaftliche  
Buchhandlung GmbH &  
Co.KG  
Otto-Suhr-Allee 26/28  
D-10 585 Berlin  
Tel.: 340-05-0  
Fax: 342-06-11  
Buchhandlung «Raduga»  
zu Hd. Frau Nina Gebhard  
Friedrichstrasse 176-179  
D-10117 Berlin  
Tel.: 203-02321

#### Hellás

«Giannicis S.A.»  
18 Fidiou str.  
Athens 10678  
«Hellenic Distribution»  
Agency Ltd.  
1 Digeny Str.  
17456 Alimos  
Tel.: 995-5383  
Fax: 993-6043

#### Hong Kong

Apollo Books Co. Ltd.  
T.S.T.P.O. Box 95170  
Kowloon  
Fax: 369-5282  
Great Eastern Book Co.  
P.O. Box 20005  
HENNESSY Post Office  
Tel.: 527-7459  
Fax: 527-2172  
Sinminchu Publishing Co. Ltd.  
Rm.1015, Tower A  
Hungghom Commercial  
Centre  
39 Ma Tau Wai Road  
Hungghom, Kowloon

Tel.: 334-9327  
Fax: 765-8471

#### Island

Skakhusid-the Chess House  
Laugavegi 118  
105 Reykjavik  
Iceland  
Tel.: 11-9768  
Fax: 551-9768

#### India

International Journals  
Distribution Agency, 4-E/15  
Jhandewalan, New-Delhi  
110005

#### Israel

Knizhnaia Lavka Ltd.  
P/O/Box 11826  
Tel-Aviv, 61116  
Fax: 528-9735  
«Steimatzky Ltd.»  
11 Hakishon Str.  
P.O. Box 1444  
BNEI-BRAK, 51114  
Fax: 579-4567

#### Italia

Libreria Edest  
Via Cairoli 12/4  
16124 Genova  
Fax: 297703  
Il Punto Editoriale S.A.S.  
Via della Cordonata 5  
00187 Roma  
Fax: 679-505  
Editoriale Stampa  
Trestina SpA  
Via Montecchi 6  
34137 Trieste

#### Japan

Nauka Ltd.  
2-30-19 Minami Ikebukuro  
Toshima-ku, Tokyo, 171  
Tel.: 981-5266  
Fax: 981-5313  
Nisso Ltd.  
Omiya dai 2 bldg. 6f  
4-1-7 Hongo  
Bunkyo-ku  
Tokyo, Japan  
Tel.: 811-6481  
Fax: 811-5160

#### Југославија

Jugoslovenska Knjiga  
Pretpata  
P.O. Box 36  
11000 Београд  
Try Republike

#### Korea

Universal Publications  
Agency Ltd.  
C.P.O. Box 9084  
Seoul, 100-690  
Tel.: 735-7809  
Fax: 723-3890

#### Kýpros

Odigitis Bookshop  
1A Romanos Str.  
Nicosia  
Fax: 45-37-57

#### Latvija

Latvijas Pasts  
LV-1000 Riga  
Brivibas bulvari, 21

Tel.: 701-8842  
Fax: 701-8754  
000 «SCS» 7, Riga.  
LV-1010, Valkas, 4  
"Diena"  
Mukusalas, 41  
Riga, LV-1004  
Tel.: 706-3170  
Fax: 706-3168

#### Luxembourg

Messengeris «Paul Kraus»  
B.P.2022  
11, Rue Christophe Plantin  
L-2339

#### Magyarország

MKM Dunatrade KFT  
1035 Budapest III.  
Kerek u.80  
Tel.: 250-2358  
Fax: 250-0233

#### Македонија

Knjigoizdateilstvo Makedonska  
Knjiga  
ul. 11 Oktomvri, b.b.  
91000 Скопје  
Народна и Университетска  
Библиотека  
Климент Охридски  
булв. Тоце Делуев, 6  
91000 Скопје

#### Nederland

Pegasus Subscription  
Department  
P.O.Box 11470  
1001 GL Amsterdam  
Tel.: 623-1138  
Fax: 620-3478  
Martinus Nijhoff International  
P.O. Box 269  
2501 AX 's-Gravenhage  
Tel.: 684-400  
Fax: 615-698

#### New Zealand

Mercury Direct Marketing  
P.O. Box 24013 and 24235  
Royal  
OAK Auckland  
2 Carr Road MT Roskill  
Auckland  
Tel.: 625-3010  
Fax: 625-3006

#### Norge

Akademika Universitetsbokhandel  
P.O. Box 84-Blindern  
N-0314 Oslo  
Tel.: 853-030  
Fax: 853-053

#### Österreich

Gerold & Co.  
Graben 31  
1011 Wien  
Tel.: 533-50-140  
Fax: 533-50-1412

#### Polska

«Ars Polona»  
Centrala Handlu  
Zagranicznego  
Krakowskie Przedmiescie, 7  
Warszawa

IPS JOURNALS  
ul. Piekna, 24/26  
00 549 Warszawa  
Fax: 621-5470

Orpan  
Biuro Importu  
Palac Kultury i Nauki  
00-901 Warszawa  
Fax: 26-8670

«RUCH» S.A.  
Oddzial Krajowej Dystrybucji Prasy  
Dzial Wspolpracy z Zagranico  
ul. Towarowa, 28  
00958 Warszawa  
Fax: 620-1762

PRESS  
Pl. Na Rozdrozu, 3  
00 584 Warszawa  
Fax: 628-8399

#### Romania

Rodipet S.A.  
Piața Presei Libere No 1 -  
Sector 1,  
București

#### Србија

PROEX EXPORT-IMPORT  
AGENCY  
TERAZIJE, 16/1,  
1001 Београд

#### Slovakia

PNS S.P.  
Pribrnova 25  
813 81 Bratislava  
Fax: 566-4814

«Slovart» G.T.G. Ltd.  
Krupinska, 4  
852 99 Bratislava 5  
Fax: 839-485

#### Slovenia

Cankarjeva Založba  
P.O. Box 201-IV  
61001 Ljubljana  
Državna Založba Slovenije  
P.O. Box 50-I  
61000 Ljubljana

#### Suisse

Pinkus Genossenschaft  
Froschaugasse 7  
Postfach 8025 Zürich  
Tel.: 251-2674  
Fax: 251-2682

Librairie Cobram  
Rue due Grand Pre 11  
CH-1211 Geneve 7  
Tel.: 733-9512  
Fax: 740-1530

Dynapress Marketing S.A.  
Subscription Dept.  
38 Avenue Vibert, CH-1227  
Carouge, Geneve  
Tel.: 308-0444  
Fax: 308-0859

#### Suomi

OY TIBO-TRADING AB  
Subscriptions Department  
P.O. Box 33  
SF-21601 Pargas  
Tel.: 214589-355  
Fax: 214589-164

SUOMALAINEN  
KIRJAKAUPPA  
Subscription Department  
P.O. Box 2  
SF-01641 Vantaa  
Tel.: 9852-751  
Fax: 9852-7990

Akateeminen Kirjakauppa  
Services Subscription  
PL/PB 23  
SF-00371 Helsinki  
Tel.: 12141  
Fax: 121-4450

Hansel Ltd.  
P.O.Box 108  
00381 Helsinki  
Tel.: 560-21  
Fax: 560-2360

Translatio Rustica  
Isonmitynkatu 3A  
SF-00520 Helsinki  
Tel.: 777-2357  
Fax: 757-1295

#### Sverige

Wennergren-Williams  
Informationsservice AB  
Subscription Department  
P.O. Box 1305, S-17125 Solna  
Tel.: 7059-750  
Fax: 2700-71

Bibliotekstjänst AB  
Subscription Department  
Traktorv. 11, Box 200  
S-22100 Lund  
Tel.: 180-000  
Fax: 307-947

#### USA

Victor Kamkin  
Bookstore INC  
4956 Boiling Brook Parkway  
Rockville, MD 20852  
Tel: 881-5973  
Fax: 881-1637  
Victor Kamkin  
Bookstore, Inc.  
925 Broadway  
New York, N.Y. 10010  
Tel.: 673-0776

Znание Book Store  
5237 Geary Boulevard  
San Francisco, CA 94118  
Tel.: 752-7555  
Fax: 752-4347

Almanac Press, Inc.  
501 South Fairfax Avenue  
Suite 206  
Los Angeles, CA 90036  
Tel.: 931-2692  
Fax: 931-7748

#### Vietnam

XUNHASABA  
32 Hai Ba Trung  
Hanoi, S.R.V.  
Fax: 8252-860

XUNHASABA  
25B Nguyen Binh Khiem  
1st District  
Hochiminh City  
Tel.: 8241-320  
Fax: 8241-321

В Москве вы можете оформить подписку на наш журнал с доставкой по любому адресу в любой стране. Обращайтесь по адресу: 117049 Москва, Б.Якиманка, 39, АО «Международная книга», фирма «Периодика».  
Контактный телефон 238-4967  
Факс 238-4634

In Moscow You can take a subscription to our magazine with a delivery to any address in any country all over the world at: 117049 Moscow, Bolshaya Yaki-manka, 39, AO «Mezhdunarodnaya kniga», «Periodika» company.  
Contact tel.: (095) 238-4967  
Fax: (095) 238-4634

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10



924-24-80, 928-88-69; факс 315-0698

101000 Москва, Главный почтамт, а/я № 648

Художественный редактор Т.А. Дворецкова

Сдано в набор 1.11.98. Подписано в печать 1.12.98. Формат 60x80 1/8.  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. . Заказ 558

ЗАО «Знак», 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10  
Отпечатано в типографии МЭИ  
111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 13

## Dear readers!

We are pleased to inform you that beginning from 1998 the journal «Electrical Technology» is published and distributed by the «Znack» Publishing House (Russia) under the title «Electrical Technology Russia» (ISSN 1028—7957).

As before it is a quarterly edition of the same size and volume. It appears in the form of four annual issues in April, July, October and January.

The «Electrical Technology Russia» is an English version of one of the oldest journals of Russian Academy of Sciences — «Elektrichestvo» (founded in 1880).

Annual (1999) subscription rates: Europe and CIS countries, US\$ 985. All other countries, US\$ 1115. The two-year institutional rate is US\$ 1872 and US\$ 2118 respectively. The three-year institutional rate is US\$ 2748 and US\$ 3111 respectively. Prices include postage and insurance.

The above rates apply to orders for 1 to 5 copies. For orders for 6 to 10 copies the rates are reduced by 7%. For orders for more than 10 copies the reduction is 10%.

If you wish to receive the «Electrical Technology Russia» please advise us of the number of the copies required and the addresses of subscribers. The payment due should be sent to:

BIC-KOD S.W.I.F.T.: SABR RU MM 100  
SAVINGS BANK OF THE RUSSIAN  
FEDERATION, MOSCOW BANK  
KRASNOPRESNENSKOYE BRANCH 1569/01664  
/30301840638000603817/  
Moscow, B.Gruzinskaya str., 12  
JSC «ZNACK»  
/40702840538170100450/

# **ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СЛУЖАЩИХ**

Российской академии государственной службы  
при Президенте Российской Федерации



*Является государственным учебным заведением. Осуществляет повышение квалификации и профессиональную переподготовку специалистов государственных, муниципальных и частных организаций в области финансового и кадрового менеджмента, маркетинга. Обучает специалистов топливно-энергетического комплекса и других отраслей народного хозяйства России.*

*В структуру Института входят кафедры:*

- Государственное и муниципальное управление
  - Управление персоналом*
  - Антикризисное управление*
  - Экономика и управление*
  - Финансы, цены, аудит**
- Эксплуатация электрических станций, сетей и систем*
- Ремонт и модернизация энергооборудования
  - Информационные технологии**
- Дистанционное преподавание актуальных проблем госслужбы
  - Компьютерный центр**

**Адрес: 113035 Москва, ул. Садовническая, 77,  
корп. 2, стр. 1.**

**Тел.: (095) 953-2583, Факс: 953-2782,**

**E-mail: secr@ipkgos. msk. ru**

*Если Вы работаете в области энергетики или электротехники,  
позаботьтесь о том,  
чтобы Ваши предприятие, лаборатория, кафедра  
не опоздали с подпиской на*

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

- старейший отечественный теоретический и научно-практический журнал, орган Российской Академии наук, Федерации энергетических и электротехнических обществ;
- выходит ежемесячно, предназначен для высококвалифицированных специалистов в области энергетики и электротехники;
- публикует теоретические и научно-практические работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров, освещает работу российских и международных конференций, рецензирует учебники и монографии по тематике журнала, помещает материалы по истории электротехники, статьи о выдающихся отечественных и зарубежных ученых;
- журнал поступает во все промышленно развитые страны мира.

*Условия подписки в России и странах СНГ указаны  
в Объединенном каталоге Государственного комитета РФ  
по связи и информатизации «Подписка-99»*

*Зарубежные читатели могут подписаться на наш журнал  
по адресам фирм, указанным в этом и предыдущих номерах*

*В Москве подписку от зарубежных читателей на «Электричество» и его английскую версию «Electrical Technology Russia»  
принимает АО «Международная книга», фирма «Периодика»  
(117049, Б. Якиманка, 39, тел. 238-4967, факс 238-4634)*