

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА **9 2001**

ГОСУДАРСТВЕННОМУ НАУЧНОМУ ЦЕНТРУ

**"ВСЕРОССИЙСКИЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. В.И. ЛЕНИНА"**



ОСНОВАН В 1921 г.

2001, № 9-12

УЧРЕДИТЕЛИ

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

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В.,
МЕЩЕРЯКОВ В.М., СОРИН Л.Н.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета),
ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И.,
ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

КОЧЕТКОВ В.Д.

БЕЛКИН Г.С., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х.,
ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А.,
РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВС-
КИЙ О.В. (зам. главного редактора),
ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,
УСОВ Н.Н., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕН-
ЦЕВ С.Н.

Издатель: ЗАО "Знак"

109280, Москва, ул. Ленинская
слобода, 23, к. 214

Адрес редакции:

123242, Москва,
Зоологическая ул., 11, комн. 213

Факс/телефон: 254-11-52

E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

*При перепечатке ссылка на журнал
«Электротехника» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с
точкой зрения авторов статей.
За содержание рекламных материалов
редакция ответственности не несет.
Рукописи статей не возвращаются.*

СОДЕРЖАНИЕ

Козлов В.Б., Ковалев В.Д. Состояние и перспективы развития высоковольтного электротехнического оборудования	1
Бондалетов В.Н. Исследования и разработки высоковольтного научно-исследовательского центра (ВНИЦ) ВЭИ	5
Думаневич А.Н., Якивчик Н.И. Силовое полупроводниковое приборостроение в начале XXI века	9
Ковалев В.Д., Мельников В.С., Орлов В.Н. Исследования и разработки ВЭИ в области автоматизации электроэнергетических систем	12
Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Перцев А.А., Ромочкин Ю.Г. Новые разработки ВЭИ в области вакуумных дугогасительных камер ...	17
Козлов В.Б., Ковалев В.Д., Остапенко Е.И., Петерсон А.Л. Испытательный центр высоковольтного электрооборудования ВЭИ	24
Корявин А.Р., Волкова О.В. Оценка электрической прочности изоляционных конструкций с изолированными проводящими телами	27
Левицкая Е.И., Лурье А.И., Панибратец А.Н. Проблема электродинамической стойкости трансформаторов при коротких замыканиях	31
Данилин В.В., Кокуркин М.П., Пашин М.М., Смородин А.И., Пуресев Н.И. Высокочастотные озонаторы нового поколения	39
Ковалев В.Д., Ковалев С.В. Распределенные системы противоаварийного управления с параллельной обработкой информации	41
Ивакин В.Н. Исследование характеристик сверхпроводникового индуктивного накопителя с преобразователем на основе инвертора напряжения	48
Лебедева Н.В., Лукин И.Н., Мордкович А.Г., Несвижский А.М., Цфасман Г.М. Система непрерывного контроля и диагностики силового и вспомогательного оборудования подстанции "Выборгская"	53
Мельников В.С., Мордкович А.Г., Серебряков А.З., Тарасов А.А., Чугунников Ю.В., Усачев В.В. Опыт внедрения вычислительных средств нового поколения в устройствах управления мощностью турбоагрегата типа ЭЧСР-М	56
Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Мясичев С.В., Ульянов Е.К. Комплект преобразователей напряжения для установок кондиционирования воздуха в отечественных пассажирских вагонах ...	58
Таратута И.П., Чуприков В.С. Схемотехнические и конструктивные решения преобразователей частоты для регулируемого электропривода	62
Логинов А.Г., Фадеев А.В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электро-сила»	66
Список авторов, опубликованных статей	71

Настоящий выпуск журнала посвящен 80-летию Всероссийского электротехнического института имени В.И. Ленина. Всесоюзный (Всероссийский) ордена Ленина и ордена Октябрьской революции электротехнический институт был создан постановлением Совета Труда и Оборона, подписанным В.И. Лениным 5 октября 1921 г. Перед Государственным экспериментальным электротехническим институтом, как он назывался до 1927 г., была поставлена цель «научно-экспериментального изучения и разработки всех вопросов электротехники, выдвинутых текущей жизнью, и проведением электрификации Республики, а также подготовки высококвалифицированных специалистов».

История организации, становления и развития ВЭИ неразрывно связана с развитием отечественной электротехнической науки и техники. На базе созданных научных школ и направлений из ВЭИ выделились более 10 самостоятельных научно-исследовательских институтов.

В журнале представлены результаты научно-исследовательских работ сотрудников ВЭИ имени В.И. Ленина в области высоковольтного электротехнического оборудования, силового полупроводникового приборостроения, преобразовательной техники и систем автоматического управления электротехническим и энергетическим оборудованием. Дана информация по высоковольтному испытательному центру ВЭИ.

*В.Д. Ковалев, ответственный за выпуск, первый зам.
генерального директора ВЭИ им. В.И. Ленина,
доктор техн. наук, академик АЭН*

Состояние и перспективы развития высоковольтного электротехнического оборудования

КОЗЛОВ В.Б., КОВАЛЕВ В.Д.

Рассмотрены состояние и перспективы развития высоковольтного электротехнического оборудования в нашей стране и за рубежом. Отмечена перспективность разработки оборудования со сниженным уровнем испытательных напряжений. Рассмотрены перспективы применения элегаза в коммутационной аппаратуре и преобразовательных устройств на полностью управляемых приборах в электроэнергетике.

В нашей стране по мере развития Единой энергосистемы уровень номинальных напряжений для передачи и распределения электрической энергии непрерывно увеличивался: 110, 220, 330, 500, 750 и, наконец, 1150 кВ.

Все оборудование линии электропередачи 1150 кВ Казахстан — Урал, введенной в эксплуатацию в 80-е годы, было разработано впервые в мире в Советском Союзе [1,2]. Разработаны все виды электротехнического оборудования: воздушный выключатель из 5 модулей, выключатель-отключатель, разъединитель, автотрансформатор, реактор, измерительные трансформаторы тока и напряжения, релейная защита и автоматика.

На сегодняшний день назрела настоятельная необходимость создания оборудования 1150 кВ нового поколения.

В рамках Государственного контракта между ВЭИ им. В.И. Ленина и Минэнерго РФ при участии ОАО "Институт Энергосетьпроект", Сибирской Ассоциации энергетиков, АО ВНИИЭ осуществляется разработка технических требований к новому оборудованию высоковольтных линий 1150 кВ. Разработаны, согласованы и утверждены технические требования на следующие аппараты:

- ограничитель перенапряжений;
- элегазовый выключатель;

- элегазовый выключатель-отключатель;
- трансформатор тока.

При разработке исходных требований учитывались последние достижения в области аппаратостроения, а также перспективы использования современных систем управления. Новые аппараты рассчитаны на уровень ограничения коммутационных перенапряжений $1,6 U_{ф}$.

В 2001—2002 гг. должны быть разработаны технические требования на:

- силовые автотрансформаторы;
- шунтирующие реакторы;
- управляемые шунтирующие реакторы;
- трансформаторы напряжения;
- разъединители;
- шинные опоры;
- высокочастотные заградители;
- системы диагностики оборудования.

После завершения разработки технических требований необходимо осуществить создание опытных образцов и подготовку производства для серийного выпуска электротехнического оборудования 1150 кВ нового поколения. Электротехническая промышленность России в настоящее время располагает достаточными возможностями для разработки и изготовления указанного оборудования.

Следует иметь в виду, что сегодня за рубежом, в частности в Японии, создается электротехническое оборудование на напряжение 1100 кВ.

Ранее в Советском Союзе проводились научно-исследовательские работы по созданию оборудования переменного тока на напряжение 1800 кВ. Однако в настоящее время такие работы приостановлены, поскольку на обозримую перспективу развития Единой энергосистемы более высокого класса напряжения, чем 1150 кВ переменного тока, по данным института "Энергосетьпроект" пока не требуется.

Основные усилия научно-исследовательских организаций-разработчиков должны быть направлены на повышение надежности и ресурсов работы оборудования, уменьшение массогабаритных параметров и трудоемкости изготовления оборудования, снижение потерь электроэнергии в оборудовании и эксплуатационных расходов.

Это в первую очередь может быть достигнуто путем разработки оборудования с пониженным уровнем испытательных напряжений [3]. В 1979 г. были разработаны и изготовлены трансформаторы на напряжение 500 кВ с резко сниженным уровнем изоляции. Три таких однофазных трансформатора установлены на Волжской ГЭС и двенадцать на Волгоградской ГЭС. Они были испытаны напряжением коммутационных импульсов 850 кВ и грозовых импульсов 900 кВ, что соответствует расчетному уровню перенапряжений, равному 1,72. Указанные трансформаторы были предназначены для эксплуатационной проверки работы изоляции при максимально допустимых рабочих напряжениях. Многолетняя опытная безаварийная эксплуатация подтвердила их высокую надежность. После этого были разработаны и установлены в эксплуатации еще ряд типов трансформаторов со сниженным уровнем изоляции, в частности, большое количество автотрансформаторов мощностью 167 МВ·А и напряжением 500 кВ с уровнем испытательных напряжений, соответствующих стандартному уровню для напряжения 330 кВ. Эти трансформаторы показали достаточно высокую надежность, не уступающую обычным трансформаторам.

Предлагаемые уровни ограничений перенапряжений для перспективных видов высоковольтного электротехнического оборудования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Виды ограничения перенапряжений	500 кВ	750 кВ	1150 кВ
Уровень ограничения коммутационных перенапряжений	1,8U	1,7U	1,6U
Уровень ограничения грозовых перенапряжений	2,1U	1,9U	1,8U

Ограничители перенапряжений. Для ограничения перенапряжений выпускаются ограничители перенапряжений, использующие оксидно-цинковые резисторы.

В Российской Федерации разработкой и производством оксидно-цинковых резисторов и ограничителей перенапряжений занимаются: АО "Корниловский фарфоровый завод" (г. Санкт-Петербург); АО ВЗВА (г. Великие Луки); АО "Феникс-88" (г. Новосибирск); ЗАО "АФ Полимер" (г. Санкт-Петербург); ПГ "Таври-

да Электрик" (Москва); АО "Прогресс" (г. Ухта); ПТО "Фарфор" (г. Санкт-Петербург); НПК "Варистор" (г. Санкт-Петербург) и др.

АО "Корниловский фарфоровый завод", АО ВЗВА, ПГ "Таврида Электрик" выпускают ОПН на базе отечественных варисторов. АО "Прогресс" и НПК "Варистор" выпускают только варисторы. Остальные производители выпускают ОПН на основе покупных варисторов, как правило, различных зарубежных производителей.

АО "Корниловский фарфоровый завод" использует варисторы диаметром 28 мм и высотой 10 мм. На их основе конструируются многоколонковые ОПН в фарфоровых корпусах, которые до напряжения 220 кВ не имеют взрывопредохраняющих устройств, что значительно снижает качество и надежность аппаратов. Используемые резисторы имеют нестабильную вольт-амперную характеристику (старящиеся резисторы) и небольшую пропускную способность.

АО ВЗВА использует варисторы диаметром до 60 мм и высотой 10 мм.

ПГ "Таврида Электрик" использует варисторы разработки ВЭИ им В.И. Ленина диаметром 40–60 мм и высотой до 25 мм, имеющие "не старящуюся" вольт-амперную характеристику и хорошую удельную пропускную способность. Выпускаемые ОПН имеют полимерный корпус и взрывопредохраняющее устройство на всех классах напряжений.

ОПН, выпускаемые такими известными фирмами, как АББ, "Сименс" и др., в 3–5 раз дороже ОПН отечественных производителей.

Современные тенденции совершенствования производства ограничителей перенапряжений и резисторов состоят в следующем:

- создание одноколонковых мощных ограничителей на базе резисторов диаметром до 120 мм и высотой до 60 мм;
- создание безкорпусных ограничителей, у которых внешняя полимерная изоляция напрессовывается непосредственно на резистивный столб, благодаря чему достигается повышенная взрывобезопасность, значительное снижение массогабаритных показателей и существенное уменьшение себестоимости продукции.

Трансформаторное оборудование. Российскими и зарубежными предприятиями создаются конструкции аппаратов и трансформаторов с применением новых изоляционных материалов и полимерных изоляторов, разрабатываются новые технологии производства, системы диагностики и управления [4]. В мире проводятся исследования и разработки оборудования на основе высокотемпературной сверхпроводимости.

Для массового применения на обозримую перспективу сохраняется традиционное исполнение трансформаторов.

После распада Советского Союза ОАО "Электрозавод" полностью освоило производство силовых трансформаторов и автотрансформаторов мощностью до 400 МВ·А на напряжения 110–500 кВ.

Новыми направлениями в развитии трансформаторостроения являются:

- применение малогабаритного высоковольтного кабеля в обмотках трансформатора;
- применение аморфной стали;
- использование трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводимостью;

• применение в трансформаторах силовой электроники, которая может стать существенной частью трансформаторов в будущем.

Трансформаторы с обмотками из высоковольтного кабеля с полиэтиленовой изоляцией (кабельные трансформаторы) имеют следующие преимущества: экологическая безопасность, пожарная безопасность, взрывобезопасность, повышенная надежность, хорошая перегрузочная способность, упрощение обслуживания. Фирмой АББ такие трансформаторы были созданы в 1997 г. Изготовлены и установлены в эксплуатацию два трансформатора: мощностью 20 МВ·А, 140/6,6 кВ и 16 МВ·А, 78/11 кВ.

Трансформаторы с использованием высокотемпературной сверхпроводимости (ВТС) позволяют (по данным СИГРЭ) снизить нагрузочные потери на 80—90% и уменьшить массу на 20—30%. Применение таких трансформаторов в энергосистеме позволяет использовать их способность ограничивать токи короткого замыкания. Значение перегрузочных токов будут ограничены только мощностью охлаждающего устройства.

Основным препятствием для практического применения ВТС трансформаторов является высокая стоимость провода. Считается, что при цене, равной примерно 0,06 дол. за амперметр провода, ВТС трансформаторы могут иметь экономические преимущества.

Российскими предприятиями разработаны управляемые реакторы на напряжение 110 кВ. Выполнены проектные проработки управляемого реактора на напряжении 500 кВ. Управляемые подмагничиванием реакторы являются новым видом трансформаторной продукции. По своим функциональным возможностям управляемые реакторы являются регулируемыми электротехническими комплексами, на новом уровне решающими многие вопросы управления и оптимизации режимов работы электрических сетей.

Применение автоматических систем коммерческого учета электрической энергии (АСКУЭ), микропроцессорных защит и автоматизированных систем управления технологическими процессами производства и распределения электроэнергии предъявляет повышенные требования к классу точности измерительных трансформаторов.

Увеличение класса точности может быть достигнуто путем применения оптоэлектронных измерительных трансформаторов тока и напряжения. Кроме того, переход на оптоэлектронные измерительные трансформаторы позволил бы также существенно упростить системы автоматизации и релейной защиты (в части интерфейсов сопряжения с измерительными трансформаторами).

Ряд зарубежных фирм, например АББ, выпускает сегодня оптоэлектронные измерительные трансформаторы. Они имеют существенно большую стоимость по сравнению с традиционными измерительными трансформаторами тока и напряжения и поэтому рынок сбыта их пока ограничен. Исследования и разработки оптоэлектронных измерительных трансформаторов проводятся в некоторых отечественных организациях, в том числе, в ВЭИ им. В. И. Ленина.

Коммутационная аппаратура. Перспективы дальнейшего развития и применения высоковольтной коммутационной аппаратуры представлены в табл.2.

Как видно из табл.2, для высоковольтных подстанций напряжением от 110 до 1150 кВ перспективно применение как КРУЭ, так и элегазовых выключателей.

Таблица 2

Виды аппаратов	6-10 кВ	35 кВ	110 кВ	220 кВ	330 кВ	500 кВ	750 кВ	1150 кВ
КРУЭ			+	+	+	+	+	+
Элегазовые выключатели	+	+	+	+	+	+	+	+
Вакуумные выключатели	+	+	+					

Выбор типа оборудования обуславливается экономической целесообразностью, условиями эксплуатации или окружающей обстановкой. Для подстанций напряжением 6—10 и 35 кВ целесообразно применение вакуумных выключателей, однако в ряде случаев могут быть применены и элегазовые выключатели.

Состояние развития элегазового оборудования в России:

1. В настоящее время освоено серийное производство КРУЭ 110—220 кВ ("Энергомеханический завод", г.Санкт-Петербург), отдельно стоящих элегазовых выключателей 110 и 220 кВ серии ВГТ, 110—500 кВ серии ВГУ и ВБЭ-35 кВ ("Уралэлектротяжмаш", г.Екатеринбург), элегазовых выключателей 110—220 кВ для КРУЭ (комбинат "Электрохимприбор", г.Лесной, Свердловская обл.).

2. Завершена разработка КРУЭ 330—500 кВ, отдельно стоящих элегазовых трансформаторов тока типа ТГФ на 110—220 кВ, баковых элегазовых выключателей типа ВГБ на 110—220 кВ (НИИВА, г.Санкт-Петербург), КРУЭ 110—220 кВ с совместным расположением фаз в одной оболочке (ВЭИ им. Ленина).

3. Практически завершена разработка бакового выключателя 110 кВ и элегазового выключателя 6—10 кВ (НТЦ РЯЦ ВНИИЭФ, "ЭЛЕГАЗ-КОНВЕРСИЯ", ВЭИ им.Ленина), колонкового элегазового выключателя 220 кВ ("Уралэлектротяжмаш").

4. Ведутся разработки элегазовых трансформаторов напряжения на 110 кВ, КРУЭ на 420 кВ (ВЭИ им.Ленина), систем диагностики элегазового оборудования (СКТБ ВКТ Мосэнерго, НИИВА, ВЭИ им. Ленина).

Уровень разработок элегазового оборудования приближается к лучшим мировым образцам — особенно работ, выполненных в рамках международных проектов: ВЭИ — Корейский электротехнологический институт (Южная Корея), ВЭИ — "Кромптон Гривз" (Индия), ВЭИ — "Самсунг" (Южная Корея), НИИВА — "Хендэ" (Южная Корея).

Основными направлениями в развитии коммутационной высоковольтной аппаратуры в мире являются:

1. Применение синхронизированных управляемых выключателей. За рубежом такие выключатели созданы. Они комплектуются соответствующим блоком управления приводом, который обеспечивает отключение тока при прохождении его через нулевую фазу.

2. Снижение энергии приводов на единицу разрывной мощности.

3. Увеличение надежности при коммутации в специальных режимах.

4. Использование КРУЭ на все напряжения, при которых происходит передача электроэнергии, в том числе для линий электропередач сверхвысокого напряжения.

5. Совершенствование КРУЭ путем объединения функций нескольких аппаратов в одном.

6. Улучшение технико-экономических характеристик коммутационной аппаратуры за счет снижения материалоемкости изделий, уменьшения габаритов.

7. Использование новых изоляционных материалов.

8. Интеграция управления диагностикой коммутационного оборудования в схему подстанции.

9. Основные усилия разработчиков должны быть сосредоточены на повышении надежности, экономичности, упрощении конструкции и увеличении срока службы элегазовой аппаратуры.

В ближайшем будущем для коммутационных аппаратов с движущимися контактами на напряжение 110 кВ и выше нет разумной альтернативы элегазу как изоляционной и дугогасительной среде. По-прежнему наблюдается тенденция к более широкому использованию КРУЭ, а также расширению номенклатуры высоковольтных устройств, где используется элегаз.

Проводятся исследования по применению тиристорной технологии для коммутационных аппаратов. Практическое использование сверхпроводников в коммутационной высоковольтной технике пока еще невозможно, так как высокая стоимость сверхпроводников делает их не конкурентоспособными в указанной области.

Передачи постоянного тока и оборудование мощной силовой электроники. В энергосистемах мира наблюдается постоянный рост количества и мощности преобразовательных устройств. В настоящее время в эксплуатации находится более 50 передач постоянного тока (ППТ) и вставок постоянного тока (ВПТ), а также более 100 устройств на базе приборов мощной силовой электроники мощностью более 10 МВт. В ближайшие 10 лет планируется построить и ввести в эксплуатацию около 20 новых мощных ППТ и ВПТ, а также большое количество устройств для гибких электропередач переменного тока (ГЭПТ).

Применение передач и вставок постоянного тока целесообразно в следующих случаях:

1. Передача больших мощностей на большие расстояния (экономичность, управляемость, надежность).

2. Связь энергосистем, работающих с разными частотами (например, в Японии).

3. Межгосударственные связи (независимость управления от частоты передающей и приемной энергосистем).

4. Передача мощности через водные преграды (экономичность).

5. Управление мощностью в кольцевых схемах энергосистем переменного тока.

Наиболее интенсивно ведется проектирование и строительство новых электропередач постоянного тока в Индии, Китае, Норвегии, Бразилии, Австралии и других странах.

Сооружаемая в настоящее время в Китае ГЭС "Три ущелья" будет крупнейшей в мире. Ее мощность составит 22,4 ГВт. Вырабатываемую электроэнергию планируется передавать в разные регионы страны с помощью как передач переменного тока 500 кВ, так и трех ППТ напряжением ± 500 кВ общей мощностью 7200 МВт (две передачи по 3000 МВт и одна 1200 МВт). Первая из этих ППТ Лонгкян—Дженпин с ЛЭП длиной 890 км должна быть введена в эксплуатацию в 2002—2003 гг.

В России успешно работает с 1978 г. вставка постоянного тока в г. Выборге, соединяющая энергосистемы России и Финляндии. Завершено строительство, проведены испытания и введен в опытно-промышленную эксплуатацию в 2001 г. четвертый преобразовательный блок (КВПУ-4) мощностью 350 МВт.

В течении 38 лет успешно эксплуатировалась передача постоянного тока Волгоград — Донбасс на напряжение ± 100 кВ. Однако в настоящее время указанная передача практически не загружена.

Отечественными предприятиями в 70-е годы был разработан комплекс электротехнического оборудования для уникальной ППТ Экибастуз — Центр на напряжение ± 750 кВ и мощность 6000 МВт. К сожалению, строительство этой передачи не было завершено. Таким образом, Россия, которая в недавнем прошлом занимала передовые позиции в создании и внедрении преобразовательной техники в электроэнергетические системы, в настоящее время теряет свои позиции.

В мире широко развивается техника передачи электроэнергии постоянным током и технология создания гибких энергосистем переменного тока.

В последнее время фирма "Сименс" разработала преобразовательный вентиль на базе фототиристоров. Опытный образец вентиля на напряжение 133 кВ и ток 2000 А был установлен на подстанции "Силайло" Тихоокеанской ППТ в 1997 г. вместо одного из ртутных вентилях. Двухлетний опыт эксплуатации показал высокую надежность этого вентиля. В перспективе планируется в рамках реконструкции Тихоокеанской ППТ провести замену всех ртутных вентилях на вентили с применением фототиристоров.

Фирма АББ разработала новую технологию создания преобразователей на полностью управляемых приборах — IGBT-транзисторах. На их базе фирма разработала, изготовила и ввела в эксплуатацию ППТ мощностью 50 МВт, напряжением ± 80 кВ (1999 г., о. Готланд), СТК мощностью ± 22 Мвар (1999 г., металлургический завод в Хагфорде, Швеция), ВПТ мощностью 36 МВт (2000 г., США-Мексика).

Фирма "Мицубиси" (Япония) разработала преобразователи на основе инверторов напряжения на базе запираемых тиристоров на ток 6000 А, напряжение 6000 В на шайбе диаметром 150 мм для ВПТ, СТАТ-СОМ и других устройств ГЭПТ, нашедших применение как в электроэнергетических системах, так и в системах электроснабжения крупных промышленных потребителей и на транспорте.

В отличие от традиционных источников реактивной мощности, использующих конденсаторные батареи и реакторы, в СТАТКОМ потребление или выдача реактивной мощности осуществляется за счет регулирования собственно преобразовательных устройств с помощью полностью управляемых приборов. Это новое устройство, с помощью которого может быть обеспечена гибкость управления энергосистемами переменного тока.

Исследования по созданию устройств для ГЭПТ проводятся в ряде отечественных организаций (ВЭИ им.Ленина, ВНИИЭ, НИИПТ и др).

Научно-исследовательскими, проектными и эксплуатационными организациями (ВЭИ им.Ленина, НИИПТ, Энергосетьпроект, МЭС Северо-Запада РАО ЕЭС России) завершается ввод в промышленную эксплуатацию КВПУ-4 Выборгской ВПТ, обо-

рудование для которого было разработано отечественными предприятиями, в частности, ВЭИ им. Ленина создана новая микропроцессорная система управления преобразовательными блоками с использованием принципов мажорирования [5].

ВЭИ им.Ленина и АО "Ансальдо-ВЭИ" разработан новый преобразовательный модуль с использованием тиристоров типа T193-2500 со следующими основными характеристиками.

Повторяющееся импульсное напряжение, В	6000
Средний номинальный ток, А	2500
Ударный ток 10 мс с приложением обратного и прямого напряжения, А	26000
Критическая скорость нарастания прямого тока, А/мкс	200
Время выключения, мкс (не более)	500

Исследования и разработки высоковольтного научно-исследовательского центра (ВНИЦ) ВЭИ

БОНДАЛЕТОВ В.Н.

Рассмотрены исследования и разработки ВНИЦ ВЭИ в области высоковольтной импульсной электротехники за 30-летний период своего существования.

На протяжении 80-летней истории становления и развития ВЭИ им. В.И.Ленина создал и в дальнейшем выделил в самостоятельные организации научные центры, институты, конструкторские бюро, заводы и другие структуры в различных направлениях электротехники (электромеханика, кабельная техника, электроосветительная техника и многие другие). Особое место среди таких научных центров занимает Высоковольтный научно-исследовательский центр в г. Истре Московской области, являющийся филиалом ВЭИ им. В.И.Ленина.

Решение о создании центра было обусловлено Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР (1967г.) в связи с развитием сверхвысоковольтных систем постоянного тока для передачи больших мощностей порядка 6 ГВт из Сибири и Казахстана на Урал и в Европейскую часть Советского Союза. Глобальная сверхзадача при успешном решении обеспечивала эффективное использование всех преимуществ каскадов Сибирских ГЭС и сдвиг максимума нагрузок по часовым поясам.

Однако к 60-м годам уникальная научно-экспериментальная база ВЭИ в Москве была перегружена и требовала, особенно в части ультравысоковольтного оборудования, дальнейшего развития. В результате было принято решение о создании филиала ВЭИ в г. Истре Московской области. Началось строительство научно-лабораторных корпусов, жилья для сотрудников. Одновременно с созданием филиала в него вошли рабочие коллективы небольшого механического завода (преобразованная МТС) и мастерские ЖБИ. Именно инженеры и рабочие этих коллективов на первых порах решали многие задачи строительства и изготовле-

Для поддержания разработок отечественного комплекса преобразовательного оборудования для ППТ и ВПТ на мировом уровне необходимо наличие конкретных проектов в ЕЭС России.

Список литературы

1. Бортник И.М. Создание комплекса электрооборудования 1150 кВ и перспективы его совершенствования// Электротехника. 1987. № 6.
2. Bortnik I. M., Belyakov N. N., Djakov A. F. a.o. 1200 kV Transmission line in the USSR. The first results of operation // CIGRE, Paris, 1988. P. 38—09.
3. Вариводов В. Н., Волкова О. В., Ковалев В. Д. и др. Перспективы создания нового поколения электрооборудования 1150 кВ, обеспечивающего высокий уровень надежности//Электротехника. 1996. № 8. С. 10—16.
4. International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE). Session Group 12, 13. Paris, 2000.
5. Kovalev V.D., Kubareva I.S., Mazurenko A.K. a.o. New generation of control and protection systems for HV converter units of Vyborg back-to back HVDC link // CIGRE. Paris, 1994. P. 14—301.

ния макетных и опытных образцов первых научно-технических разработок.

Первые крупные научно-технические разработки относятся к началу 70-х годов, когда в Истре был создан уникальный стенд для исследования и испытания преобразовательных блоков для передачи постоянного тока "Экибастуз-Центр" на 1,5 млн. В (± 750 кВ). В процессе этой работы было доказано преимущество системы охлаждения преобразовательных блоков деионизованной водой, блестяще себя оправдавшей впоследствии на серийном оборудовании, не одно десятилетие работающем у электроэнергетиков, например на "Финской вставке".

Параллельно с этой работой интенсивно проводились исследования и разработка сверхвысоковольтной импульсной техники, были разработаны и поставлены заказчику серия установок для испытаний на электромагнитную стойкость типа "Тьма".

Так, уже с первого начального периода работы коллектива ВНИЦ ВЭИ были определены два основных взаимосвязанных направления научно-технической деятельности:

1. Разработка ультравысоковольтных и силовых испытательных стендов для проведения исследований с целью повышения надежности существующего оборудования и создания нового оборудования перспективных классов напряжения.

2. Комплексные исследования и создание нового электротехнического оборудования для народного хозяйства, промышленности, обороны.

В 1974 г. были успешно разработаны первые поколения отечественных тиристорных модулей для преобразовательных подстанций линий электропередач

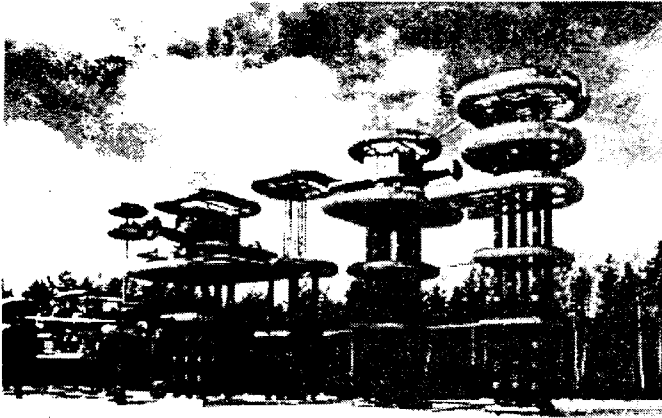


Рис.1. Каскад трансформаторов на 3,6 МВ

постоянного тока на 1,5 МВ.

Развитие научно-экспериментальной базы ВЭИ обусловило создание во ВНИЦ ВЭИ уникальных ультравысоковольтных исследовательских и экспериментальных стендов, необходимых для новых направлений работы и требующих значительных площадей для своего размещения [1]:

— каскад трансформаторов на 3,6 МВ действующего значения (три последовательно включенных трансформатора на 1,2 МВ, амплитудное значение более 5 МВ), разработанный совместно учеными ВЭИ и фирмой TUR (ГДР) и изготовленный в ГДР, превосходящий известные в мире каскады трансформаторов на напряжение $3 \times 0,75$ МВ (рис.1);

— генератор импульсных напряжений (ГИН) с максимальным напряжением 9 МВ и энергией в разряде более 1 МДж, разработанный и изготовленный во ВНИЦ ВЭИ (рис.2);

— генератор импульсных напряжений на 5 МВ — макет генератора подвесного типа, разработанного для Главного корпуса ВНИЦ ВЭИ на напряжение 15 МВ;

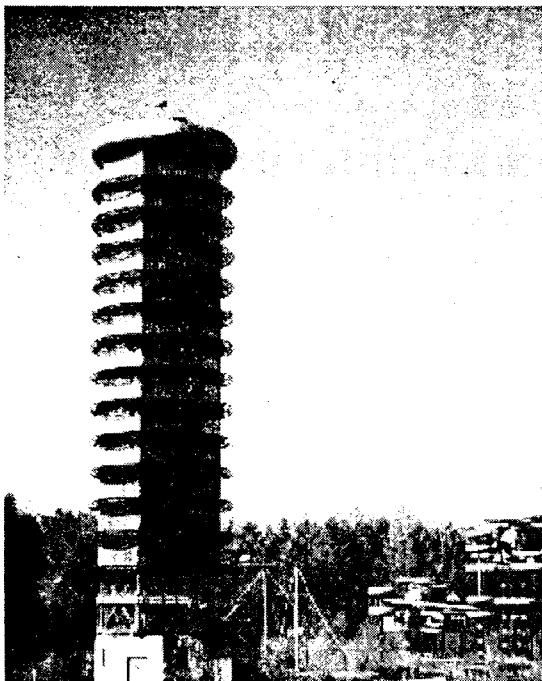


Рис. 2. Генератор импульсных напряжений на 9 МВ

— установка постоянного напряжения с испытательным напряжением 2,25 МВ и др.

В мире нет не только такого уникального комплекса стендов, но и некоторых из приведенных установок в отдельности. Уникальные габариты и конструкцию имеет и ГИН-9 МВ [2, 3]. Впервые в качестве опорной изоляции на нагрузку более 200 т использованы стеклопластиковые цилиндры со специальной намоткой армирующим стекложгутом, которые работают уже 25 лет в очень сложных условиях на открытом воздухе.

Впервые в мире с использованием ГИН-9 МВ, который эксплуатировался при зарядном напряжении до 6 МВ, получены уникальные научные результаты по исследованию физики разряда в сверхдлинных воздушных промежутках: получены "аномальные" разряды, когда разряд от ГИН развивался не в относительно коротком (15—20 м) промежутке с резко неоднородным полем, а параллельно ему в слабо неоднородном поле, но длиной 150—200 м. При этом траектория разряда имела вероятностную природу, представляя полную аналогию траектории канала молнии.

Исследованы на крупномасштабных моделях молниепоражаемость и молниестойкость летательных объектов, проведены натурные испытания их отдельных узлов, что благодаря сверхвысоким параметрам испытательного комплекса позволило получить качественно новые результаты, полностью соответствующие ограниченному количеству наблюдений поражения молнией реальных летательных объектов. Эти исследования легли в основу разработанной во ВНИЦ ВЭИ методики расчета молниепоражаемости летательных объектов и методов их молниезащиты, позволяющей значительно уменьшить вероятность повреждения объекта при прямом разряде молнии (рис.3).

Кроме того, предложены и опробованы методы комплексных испытаний на молниезащищенность с

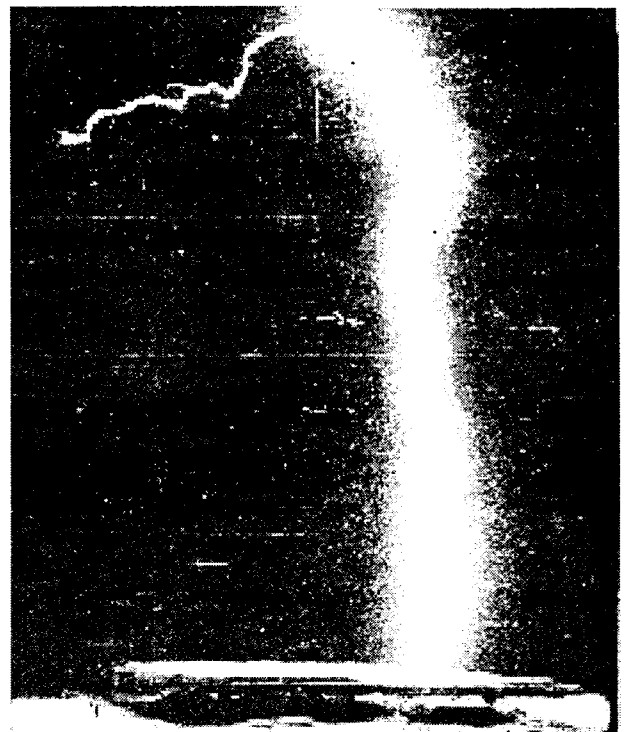


Рис.3. Испытания модели самолета на молниепоражаемость

использованием искусственных моделей грозовых ячеек большой протяженности (аэрозольное облако) [4].

- Длина электрических разрядов, инициируемых этими ячейками, достигала 6—8 м. Проведена большая работа по созданию диагностических и измерительных средств для исследования физических свойств газового разряда. Среди них можно отметить ряд методик спектрально-оптической диагностики разрядов по интенсивностям собственного излучения полос азота.

Полученные результаты доказали высокую потенциальную возможность комплекса высоковольтных испытательных стендов по получению уникальных научных результатов в данной области, и, прежде всего, в области исследования пробоя длинных воздушных промежутков. В практическом плане был проведен широкий комплекс испытаний, связанных с координацией изоляции электроэнергетических установок высокого и сверхвысокого напряжений (например, оборудования ЛЭП 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока).

Ученые и специалисты ВНИЦ ВЭИ разработали, испытали и поставили на опытно-промышленную эксплуатацию комплектную кабельную установку с элегазовой изоляцией на параметры 1500 кВ (± 750 кВ) постоянного тока (ККУ ± 750 кВ), а также газоизолированную трехфазную линию (ЛГИ-500) на параметры системы 500 кВ переменного тока.

После 1985 г., когда в результате "перестройки" было прекращено финансирование большинства работ по оборонной тематике и практически всех работ по электроэнергетике, предприятию пришлось перейти режим "двойной конверсии".

В условиях острого недостатка заказов, неплатежей бюджетов, жесткого налогового прессинга для легально работающего государственного предприятия ВНИЦ ВЭИ выстоял, не отказался от основных научных направлений, а приспособил их к условиям рынка и "оплаченного спроса".

Работы для перспективных задач энергетики продолжались "факультативно", без заказов и, соответственно, прямого финансирования за счет небольших средств на поддержание уникальной стендовой базы. Но даже в этих условиях были получены новые научные результаты, опубликованные в отечественных и зарубежных источниках.

Работы в области электромагнитной стойкости и совместимости позволили создать установки с фронтом нарастания импульса порядка 10^{-9} с при напряжениях в сотни и тысячи киловольт (рис.4). Созданы комплексы для исследования и испытаний техники на

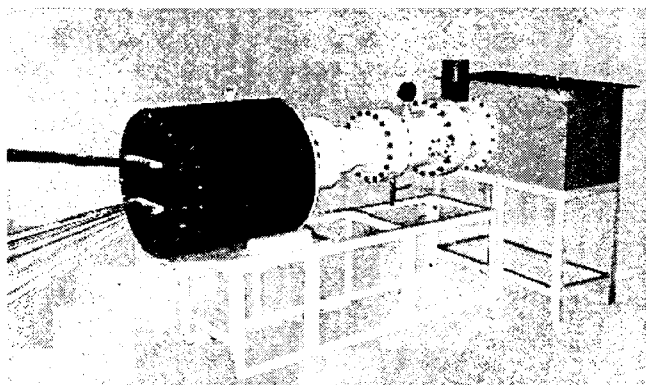


Рис.4. Формирователь субнаносекундных импульсов

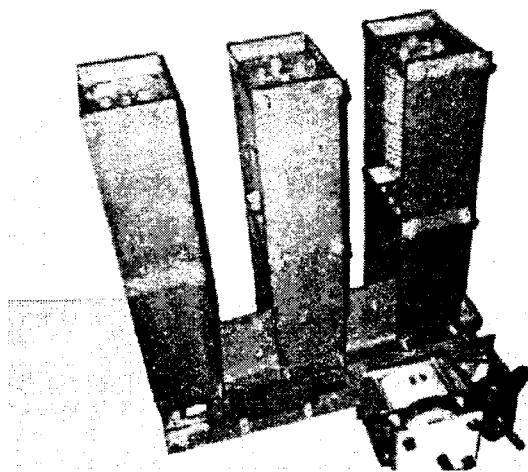


Рис.5. Вакуумный выключатель ВВЭО-10-20/630-1600

электромагнитную стойкость и совместимость, аккредитованные в установленном порядке, в том числе комплекс "Аллюр" [5]. Разработаны и серийно поставляются заказчикам защитные устройства от воздействия токов молнии и других импульсов естественного и искусственного происхождения.

Наиболее интересные результаты [6] получены в создании новых по принципам построения и параметрам вакуумных выключателей (рис.5). При использовании уникальных разработок коллектива ВНИЦ созданы системы быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР), позволяющие обеспечить самозапуск синхронных двигателей 6—10 кВ после переключения на резервную систему шин, а также сохранение подключенной нагрузки 0,4 кВ [7].

Для сложных систем электроснабжения, включая электрические станции, в том числе атомные, крупных энергоемких предприятий созданы специальные тренажеры, предназначенные как для обучения персонала, так и для "подсказки" оператору правильного решения при "нештатных" ситуациях, когда лимит времени для принятия решения крайне ограничен.

В тематике ВНИЦ ВЭИ значительное место занимают работы в области применения полупроводниковой преобразовательной техники для силового электропривода, в источниках энергии для питания нового поколения современных лазеров для промышленности и медицины, для рентгеновских аппаратов, источников энергии для различных озонаторных установок. Принципиальной основой таких устройств, позволяющих в десятки раз сократить массогабаритные показатели, является использование высокочастотных систем преобразования энергии до 10 кГц и более (рис.6).

Особое место в разработках ВНИЦ ВЭИ занимают источники питания, системы управления и защиты, основанные на использовании полностью управляемых высокочастотных высоковольтных (до сотен киловольт) электронных вентиляей [8]. Подобные системы используются в источниках питания электрофильтров, специальных источниках для электрофизических установок, экспортируются в Европу (рис.7).

В работах ученых и специалистов ВНИЦ широко представлены наукоемкие работы в области электро-технологии, среди них использование энергии силь-

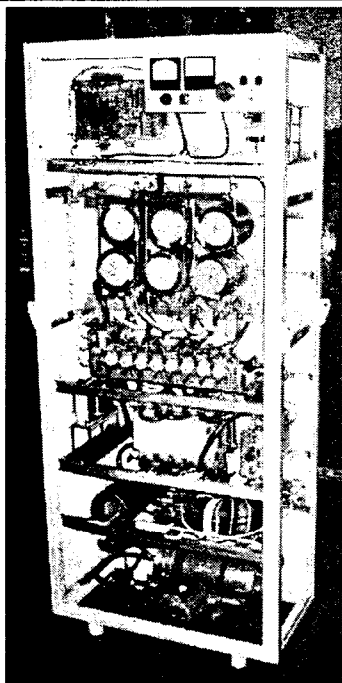


Рис.6. Источник питания генератора озона ИПГО-25/8-4

ных и сверхсильных импульсных магнитных полей (ИМП) для силового воздействия на проводящие материалы, силовое воздействие, создаваемое импульсным разрядом в жидкости, нанесение покрытий и обработка поверхности ионными и нейтрализованными пучками (необходимой плотности и материала) технологии с использованием лазерного луча и др.

Среди ряда разработок, использующих энергию ИМП, можно выделить систему аварийной защиты для реактора на быстрых нейтронах в г. Дубне, серийно изготавливаются и поставляются различные ударные установки типа МИУС для очистки технологического оборудования от налипающих, намерзающих и других сред [9—11]. Разряд в жидкости нашел применение в гамме установок типа "ЗЕВС" для очистки труб, прежде всего теплообменных установок, от различных

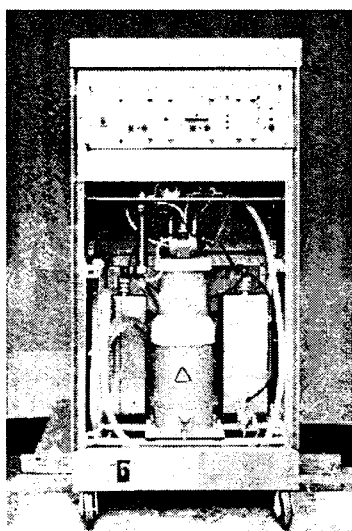


Рис.7. Высоковольтный импульсный модулятор ВИМ 30/15

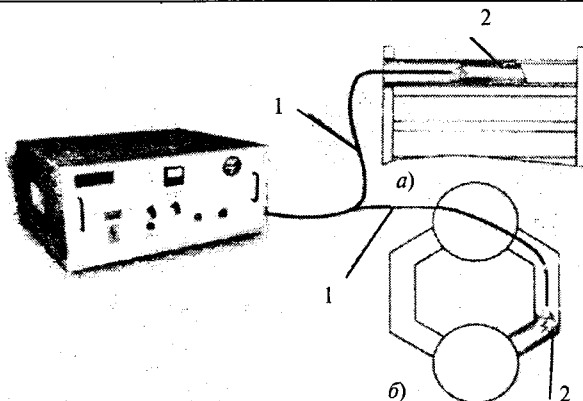


Рис.8. Электроразрядная установка очистки «ЗЕВС»:

1 — коксиальный кабель; 2 — накипь, отложения
а — горизонтальное расположение трубок, например, бойлеры; б — вертикальное расположение трубок, например, котловое оборудование

отложений (рис.8). Экологическая чистота, простота в эксплуатации и высокая производительность при умеренной цене при сроке окупаемости 3—6 мес являются лучшей рекомендацией этих установок, которые используются во многих регионах России, СНГ и дальнего Зарубежья.

Для фундаментальных исследований сверхсильных импульсных магнитных полей и разрядов с токами 50—100 МА были разработаны и созданы емкостные накопители энергии [12], позволившие провести уникальные для мировой науки исследования, в том числе получить рекордные скорости ускорения (метания) проводников в ИМП, превышающие вторую космическую скорость.

Проведены исследования по ресурсо- и энергосберегающим технологиям, в том числе в коммунальном хозяйстве. Разработаны обосновывающие научно-технические материалы по созданию международного интегративного научно-образовательного центра по нетрадиционным возобновляемым источникам энергии. В основе теории "устойчивого развития" заложена аксиома, что человечество должно отказаться от использования невозобновляемых источников энергии (уголь, газ, нефть) и перейти исключительно к использованию возобновляемых, в том числе нетрадиционных источников энергии (гидроресурсы рек, "приливная" энергии, биомасса, солнечная и ветровая энергии и т.п.). В этом плане проводимые работы по ресурсо- и энергосбережению на базе энергоэффективности и использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии весьма перспективны [13].

Указанные и многие другие работы, проведенные за 30 лет во ВНИЦ ВЭИ в г. Истре Московской области, позволили научно-производственному коллективу ВНИЦ стать неразрывной творческой частью всего коллектива ВЭИ им. В.И.Ленина и внести свой вклад к 80-летию юбилею ВЭИ.

Список литературы

1. Бондалетов В.Н., Филиппов В.Г., Перунов А.А. Ультравысоковольтные исследовательские комплексы 21 века и разработка оборудования для промышленных технологий// ВЭЛК-99. М. 28.06-03.07.99.

2. Фотин В.П., Бондалетов В.Н., Шерстюк Ю.Л., Чернов Е.Н. Генераторы грозовых и коммутационных импульсов напряжения наружной установки//Электротехника. 1983. № 8. С.60.
3. Аванский В.Р., Бондалетов В.Н., Лупейко А.В. и др. Исследования и испытания современной техники на ультравысоковольтных установках открытого высоковольтного стенда//Электротехника 2010. М. 19—22 октября 1999.
4. Кошелев М.А., Лупейко А.В., Сысоев В.С., Чернов Е.Н. Модельные исследования влияния облака заряженного аэрозоля на поражаемость объекта молнией//Электричество. 1988. № 9. С. 67.
5. Бондалетов В.Н., Кобелев А.Б., Коробко А.И. и др. Особенности создания современных имитаторов мощных импульсных электромагнитных полей//Электротехника 2010. М. 19—22 октября 1999.
6. Вершинина С.И., Гуров С.В., Степанов Д.И. Новые вакуумные выключатели для комплексных распределительных устройств напряжением 10 кВ//Электротехника. 1994. № 11. С. 5.
7. Вершинина С.И., Степанов Д.И., Пивоваров А.Ф., Савиханов Р.К. Комплекс устройств быстродействующего АВР//Электротехника. 1994. № 11. С. 6.
8. Переводчиков В.И., Липатов В.С., Матвеев Н.В., Губин Л.А. Высоковольтный электронный коммутатор для быстродействующей защиты//Электротехника. 1982. № 2. С.25.
9. Бондалетов В.Н., Тютькин В.А. Инженерный метод расчета индукционно-динамического привода//Электротехника. 1979. № 10. С.28.
10. Бондалетов В.Н., Иванов Е.Н., Тютькин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки поверхностей технологического оборудования//ВЭЛК-99. М. 28.06-03.07.99.
11. Бондалетов В.Н., Иванов Е.Н., Головинский С.В., Тютькин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки поверхностей технологического оборудования//Первая Международная конференция "Металлодеформ-99". Самара, июнь 1999.
12. Балтаханов А.М., Бондалетов В.Н., Жерлыгин В.И., Иванов Е.Н. Кабельный коллектор емкостного накопителя энергии//Приборы и техника эксперимента. 1987. № 4. С. 106.
13. Бондалетов В.Н., Филиппов В.Н. Исследования, разработка и внедрение энергосберегающих технологий с использованием сильных электромагнитных полей//ВЭЛК-99. М. 28.06-03.07.99.

Силовое полупроводниковое приборостроение в начале XXI века

ДУМАНЕВИЧ А. Н., ЯКИВЧИК Н. И.

Описаны основные этапы развития отечественного силового полупроводникового приборостроения.

Разработка и первое освоение производства отечественных силовых полупроводниковых приборов началось с середины 50-х годов XX века.

В 1957 г. в ВЭИ им. В. И. Ленина были организованы лаборатория силовых полупроводниковых приборов и отдел преобразовательной техники. Практически в эти же годы саранский завод "Электровыпрямитель", отмечающий в нынешнем году свое 60-летие, освоил выпуск первых отечественных силовых полупроводниковых приборов на основе германия и готовился к разработке диодов и тиристоров на основе кремния.

Следует отметить, что первые германиевые диоды были созданы благодаря завершению исследований плоскостных $p-n$ -переходов, проведенных тогда молодым талантливым ученым — ныне академиком, лауреатом Нобелевской премии, директором Физико-технологического института им. А.Ф. Иоффе Жоресом Ивановичем Алферовым.

Авторы гордятся тем, что начинали работать молодыми специалистами на заводе "Электровыпрямитель", являются практически воспитанниками научной школы ФТИ им. А. Ф. Иоффе и сумели внести свой скромный вклад в развитие силового полупроводникового приборостроения, работая более 30 лет в ВЭИ им. В. И. Ленина.

ВЭИ им. В. И. Ленина — головной институт в области силовых полупроводниковых приборов и преобразовательной техники на их основе — обеспечил выполнение всего комплекса научных исследований и проектно-технологических разработок, приведших к тому, что страна никогда не импортировала никаких силовых полупроводниковых приборов. Более того,

полностью удовлетворяя свои потребности в силовых полупроводниковых приборах, около 10% выпускаемых приборов экспортировала.

Рассмотрим кратко основные этапы развития и становления силовых полупроводниковых приборов — основной элементной базы преобразовательной техники — важнейшей наукоемкой подотрасли электротехники. Первыми диодами, называемыми в 1958—1960 гг. вентилями, была серия ВК (вентиль кремниевый), создаваемая по так называемой сплавной технологии вплавлением алюминия в n -кремний в вакууме. Расплавленный алюминий на поверхности пластин кремния создавал рекристаллизованный слой, где и находился $p-n$ -переход. Максимальные токи таких диодов достигали 200 А, а напряжения не превышали нескольких сотен вольт, так как $p-n$ -переход был достаточно "резким", а граница его выхода на поверхность была малой протяженности.

Принципиальные ограничения, присущие сплавной технологии, привели к тому, что уже в 1961 г. были созданы диоды, а в 1962 г. и тиристоры с использованием методов диффузии бора, алюминия и фосфора в пластины n -кремния.

Уместно отметить, что разработанные методы диффузии позволяли создать высококачественные многослойные структуры с $p-n$ -переходами на не совсем качественном тогда кремнии, и только жидкофазные источники диффузанта при термообработках приводили к геттерированию "вредных" примесей из глыбины пластин кремния на их поверхность.

Развитие методов диффузии, создания контактов, обработки и защиты поверхности $p-n$ -переходов, разработка конструкций СПП с прижимными контакта-

ДОСТИГНУТЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПП

СПП	ПРОИЗВОДИТЕЛЬ			
	Россия		Зарубежные фирмы	
	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В
Диоды	4000	6000	3000	4400
Диоды лавинные	4000	3200	—	—
Диоды быстросостанавливающиеся	800—1000	4600	3500	4500
Тиристоры	3200—5000	5400—6000	3360	5200
Тиристоры быстродействующие	1600—2000	2400—5000	2500	3000
Тиристоры лавинные	250—320	1200	—	—
Тиристоры оптронные	160	1500—2000	—	—
Тиристоры запираемые (GTO)	1250	2400	6000	6000

ми и др. позволили создать несколько поколений приборов всех известных видов, типов и конструктивных исполнений.

В настоящее время номенклатура СПП насчитывает десятки видов, сотни типономиналов СПП штыревой, таблеточной и модульной конструкций (рис.1). Детально параметры и характеристики диодов, тиристоров, симисторов, быстродействующих тиристоров и быстросостанавливающихся диодов, запираемых тиристоров, оптронных тиристоров и симисторов и других СПП приведены в таблице.

Следует отметить, что к концу XX века предельные параметры СПП достигли расчетных значений, что свидетельствует о достаточно высоком уровне технологии. Система автоматизированного проектирования приборов отработана на базе самых современных теоретических представлений о физических явлениях в многослойных полупроводниковых структурах с *p-n*-переходами, и в точности расчетных параметров можно не сомневаться. Это утверждение косвенно подтверждается тем, что к концу 90-х годов отечественные СПП в объеме выпуска более 90% достигли мирового уровня. Некоторое запаздывание в развитии отечественных СПП можно объяснить только более поздними и неполными техническими требованиями к ним со стороны разработчиков и производителей преобразовательных устройств.

Справедливости ради хочется отметить, что только разработчики преобразовательного оборудования для линий электропередачи постоянного тока выдвигали требования, обычно к тиристорам, опережающие возможности технологии производства силового полупроводникового приборостроения. И хотя массового применения СПП в электроэнергетике пока еще не произошло, мы и наши специалисты благодарны Игорю Петровичу Таратуте за его настойчивые требования увеличения предельных параметров и динамических характеристик отечественных тиристоров. Это способствовало успешному применению сверхмощных высоковольтных тиристоров в других преобразовательных комплексах (промышленный электропривод, электрифицированный транспорт и т. д.). Многие конкрет-

ные виды и типономиналы СПП ВЭИ им.В.И.Ленина создавал и создает совместно с заводскими конструкторскими бюро и проектно-технологическими лабораториями, что существенно ускоряет освоение выпуска приборов для определенных зон применения.

Так складывалась определенная специализация заводов-производителей по сверхмощным, быстродействующим, малоамперным, оптоэлектронным и другим видам СПП.

Однако практически все основополагающие исследования и разработки, результаты которых использовались в большинстве, а иногда и во всех приборах, осуществлялись ранее и проводятся сейчас в подразделениях ВЭИ им. В. И. Ленина.

Отметим наиболее важные работы института, сформировавшие конструкторско-технологические и нормативно-технические основы производства СПП:

- создание таблеточных конструкций СПП с организацией массового производства металлокерамических корпусов и оформлением всей конструкторско-технологической документации (рис.1);

- разработка технологии создания сплавных диодов и, главное, сплавных контактов многослойных кремниевых структур с термокомпенсаторами;

- разработка технологии формирования краевого профиля *p-n*-переходов (фасок) и методов их струйного травления (рис.2) и защиты (пассивации);

- разработка систем автоматизированного проектирования СПП, оптимизация технологических методов и процессов, снижающих трудоемкость, материалоемкость и т.д., для создания новых поколений СПП, единых унифицированных серий и приборов, применяемых в специфичных условиях эксплуатации;

- разработка серии выпрямительных кремниевых столбов на токи 0,4 А, напряжения до 150000 В для рентгеновских аппаратов и других зон применения;

- создание серии силовых кремниевых транзисторов на токи до 600 А, напряжения до 1200 В (рис.3) и многие другие разработки конкретных видов и типов СПП, в том числе специального назначения;

- создание всей номенклатуры воздушных и жидкостных охладителей ко всем СПП с организацией

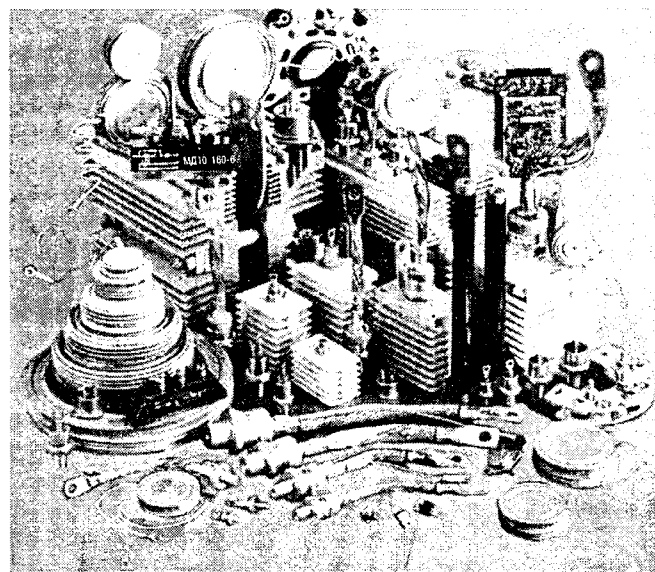


Рис.1. СПП штыревого, таблеточного и модульного исполнения

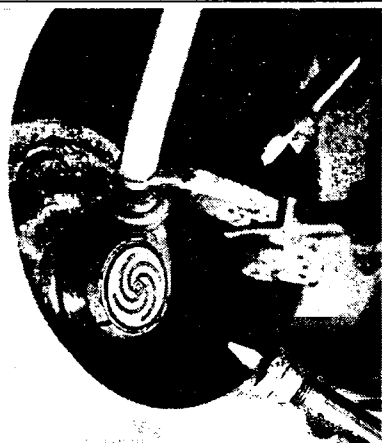


Рис.2. Фрагмент технологии формирования фаски кремневой структуры на установке струйного травления

производства соответствующих видов профилей из алюминиевых сплавов в авиационной промышленности, оформлением полных комплектов документации и проведением всеобъемлющих комплексов испытаний (рис.4);

— экспертиза всех технических требований к СПП, анализ и согласование всех технических заданий на разработку новых и модернизацию выпускавшихся приборов, оформление технических условий, разработка государственных стандартов, согласование режимов применения приборов и подготовка к изданию каталожно-справочной информации;

— разработка нормативно-технической документации и создание комплексной системы оценки (аттестации) уровня качества СПП и уровня технологии их производства, формирование заданий на разработки специального технологического оборудования, обеспечивающего реализацию управляемой воспроизводимой технологии выпуска приборов с заданными параметрами и высоким процентом выхода годных;

— организация и осуществление комплексных приемосдаточных и типовых испытаний СПП, включая испытания стойкости последних к воздействиям специальных факторов;

— выработка технических требований к основным исходным и сопутствующим технологическим мате-

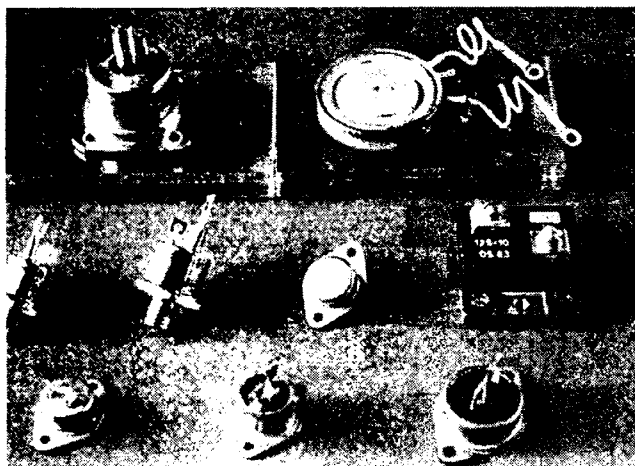


Рис.3. Конструкции силовых кремневых транзисторов

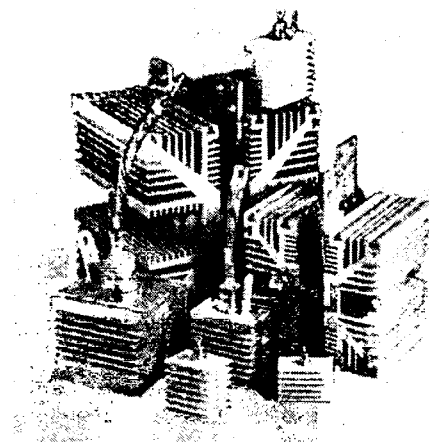


Рис.4. Воздушные охладители для СПП из алюминиевых сплавов

риалам, оценка их качества и организация производства и многие другие.

Успешное развитие силового полупроводникового приборостроения в России осуществлялось во многом благодаря тому, что в подразделениях головного института — ВЭИ им. В. И. Ленина работали и продолжают работать специалисты, накопившие опыт на заводе и в лабораториях в г. Саранске (Асина С.С., Думаневич А.Н., Дерменжи П.Г., Евсеев Ю.А., Ильичев А.Н., Конюхов А.В., Локтаев Ю.М., Якивчик Н.И., ...), окончившие аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Бурцев Э.Ф., Евсеев Ю.А., Крюкова Н.Н., Якивчик Н.И.) и обеспечившие условия формирования научной школы, вырастившей специалистов высшей квалификации — докторов наук: Дерменжи П.Г., Евсеев Ю.А., [Изидинов С.О.], [Кузьмин В.А.], Мнацканов Т.Т. и др.

Кратко о работах нынешнего юбилейного года. Специалисты НИЦ СПП ВЭИ им. В. И. Ленина выполняют следующие основные работы:

1. Поиск методов возможного повышения максимально допустимых температур тиристоров до 175°C . Повышение допустимой температуры позволит повысить надежность, улучшить массогабаритные показатели приборов. Классические диоды держат $175\text{--}210^{\circ}\text{C}$, тиристоры в основном 125°C . Есть низковольтные (400—600 В) быстродействующие тиристоры, допускающие $140\text{--}150^{\circ}\text{C}$, а мы работаем над методами повышения допустимых температур до уровня выше известных в мире.

2. Создание оптимальных конструкций структур быстросовостанавливающихся диодов с мягкими характеристиками восстановления для их совместного применения в первую очередь с биполярными транзисторами с изолированным затвором (IGBT приборы). Серия диодов на 20—200 А с напряжениями 400—1700 В и временами обратного восстановления 0,03—0,15 мкс обеспечит изыщное применение СПП во множестве высокочастотных устройств.

3. Создание быстродействующих асимметричных тиристоров (ТБА) на токи до 160 А, напряжения до 1000 В с временами выключения 2—4 мкс. Такие тиристоры позволят на несколько процентов повысить КПД преобразователей и можно будет сэкономить 1/3 расходуемых на них меди и трансформаторной ста-

ли, следовательно, снизится стоимость, улучшатся массогабаритные показатели.

4. Оптимизация "инверторного" варианта запираемого тиристора (ГТО) на токи до 1000 А, напряжения до 2000 В. Уменьшение в 2 раза количества тиристорov в агрегате приведет к снижению на 15—20% рассеиваемой мощности и экономии на системе охлаждения.

5. Разработка оптимизированных для электротранспорта быстродействующих тиристорov на токи до 800 А с напряжениями до 2200 В и временами выключения менее 32 мкс. Использование таких тиристорov может обеспечить экономию электроэнергии, потребляемой электропоездами на 20—30%.

6. Разработка снабберных защитных модулей на базе безындуктивных кремниевых резисторов большой мощности. Расчеты показывают, что применение в электрических ключах таких модулей существенно повысит надежность ключей и приведет к повышению их КПД на 10—15%.

7. Регулирование электрофизических параметров кремниевых резисторов методами диффузии "глубоких" примесей (Au, Pt и др.) или облучения элементов потоками ускоренных электронов. Классические диффузионные методы регулирования генерационно-рекомбинационных процессов (путем создания "глубоких" уровней рекомбинации) представляется более дешевым и может привести к снижению себестоимости изделий на 10—30%.

Наряду с разработками новых видов и типов СПП создаются новые технологические методы, обеспечивающие оптимальную инжекционную способность р-эмиттера запираемых тиристорov с токами до 1000 А и напряжениями 4—6 кВ.

Ведутся также в институте и другие научные исследования и конструкторско-технологические разработки, в том числе по индивидуальным заказам потребителей и производителей СПП.

Научно-технические разработки, накопленный опыт и имеющиеся технологические возможности позволяют создавать СПП с параметрами, теоретическими достижимыми на кремнии, однако производство ограничилось диаметром исходных кремниевых пластин 80 мм. Максимальное потребление кремния

сосредоточилось вокруг диаметра 60 мм, а по удельному сопротивлению используемый кремний имеет два максимума — 50 и 100 Ом·см, а предельное значение $\rho = 350$ Ом·см.

Максимально достигнутые параметры СПП в России по сравнению с зарубежными аналогами приведены в таблице.

Большинство технологических методов, процессов и конструкторских решений в силовом полупроводниковом приборостроении защищены сотнями авторских свидетельств и десятками патентов как в России, так и в других странах.

С нашей точки зрения дискретные СПП большой единичной мощности еще многие десятилетия будут использоваться в преобразовательных агрегатах электроэнергетики.

Более подробно работы ученых и инженеров ВЭИ им. В.И.Ленина описаны [1—11].

Список литературы

1. Кремниевые вентили/Под ред. **С.Б.Юдицкого**, М.: Энергия, 1968.
2. **Кузьмин В.А.** Тиристоры малой и средней мощности. М.: Советское Радио, 1971.
3. **Евсеев Ю.А., Чесноков В.Е.** Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973.
4. **Евсеев Ю.А.** Полупроводниковые приборы для мощных высоковольтных преобразовательных устройств. М.: Энергия, 1978.
5. Силовое полупроводниковое приборостроение//Труды ВЭИ. 1980. Вып. 90.
6. **Дерменжи П.Г., Кузьмин В.А., Крюкова Н.Н.** и др. Расчет силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия. 1980.
7. **Дерменжи П.Г., Евсеев Ю.А.** Силовые полупроводниковые приборы. М.: Энергоиздат, 1981.
8. **Булкин А.Д., Якивчик Н.И.** Технология и оборудование производства силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. **Григоренко В.П., Дерменжи П.Г., Кузьмин В.А., Мнацаканов Т.Т.** Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергоатомиздат, 1988.
10. **Евсеев Ю.А., Крылов С.С.** Симисторы и их применение в бытовой электроаппаратуре: М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. **Новые силовые полупроводниковые приборы и технология их изготовления**//Сборник научных трудов ВЭИ имени В.И.Ленина. 1991.

Исследования и разработки ВЭИ в области автоматизации электроэнергетических систем

КОВАЛЕВ В.Д., МЕЛЬНИКОВ В.С., ОРЛОВ В.Н.

Приведены результаты разработок устройств автоматического управления и регулирования для энергетических объектов в ВЭИ.

В тематике ВЭИ важное место занимают научно-технические и опытно-конструкторские работы по созданию устройств автоматического регулирования для различных видов энергетического оборудования и управления режимами электроэнергетических систем.

В послевоенные годы важнейшей из этих работ стала разработка автоматического регулятора возбужде-

ния сильного действия (АРВ СД) для синхронных генераторов. Эта работа явилась итогом большого объема теоретических исследований и испытаний на электродинамических моделях и в натуральных условиях, проведенных учеными и инженерами ВЭИ. АРВ СД первоначально были внедрены на гидрогенераторах Волжской ГЭС и обеспечили повышение предела мощно-

сти, передаваемой по линиям электропередачи, на 10—15%. Разработка АРВ СД была оценена присуждением Ленинской премии Г. Р. Герценбергу.

Первые образцы АРВ СД были выполнены на электронных лампах и тиратронах. Удачные схемные решения обеспечили высокую надежность и долговечность регуляторов возбуждения.

Следующим этапом работ ВЭИ по созданию промышленных устройств автоматического регулирования для энергетики стала разработка АРВ СД на базе быстродействующих высокочастотных операционных магнитных усилителей. Применение магнитных элементов существенно повысило надежность функционирования аппаратуры без ухудшения статических и динамических характеристик регулирования напряжения в нормальных и аварийных режимах энергосистемы.

На опытном заводе ВЭИ был освоен полный цикл технологического процесса производства магнитных усилителей на тороидальных сердечниках и налажен выпуск головных образцов аппаратуры регулирования.

Унифицированный АРВ СД на магнитных элементах был пригоден для работы с различными системами возбуждения гидро- и турбогенераторов и был внедрен на многих отечественных и зарубежных электростанциях, в частности, на Братской, Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС, на Асуанской ГЭС и ГЭС "Джердап-Железные ворота", на турбогенераторах мощностью 200, 300, 500, 800, 1200 МВт.

Успешное решение проблемы создания регуляторов возбуждения создало предпосылки расширения числа объектов управления и объема решаемых функциональных задач.

Интенсивное развитие отечественной энергетики в 60—70-е годы двадцатого столетия сопровождалось строительством значительного числа гидро- и тепловых электростанций с агрегатами большой единичной мощности. Энергоблоки ГЭС с паровыми турбинами с промперегревом имеют ухудшенную приемистость, в связи с чем обострилась проблема их управляемости и маневренности.

Концентрация генерирующих мощностей и связанная с этим необходимость максимального использования пропускной способности линий электропередачи усложнили проблемы обеспечения устойчивости энергосистем. ВЭИ совместно с другими научными организациями провел большой объем исследований методов и средств управления в аварийных режимах энергосистем. Итогом этих работ явилась разработка многоуровневой иерархической системы противоаварийной автоматики.

Для агрегатного уровня ВЭИ и Ленинградским металлургическим заводом было разработано на элементах аналоговой техники устройство управления мощностью турбогенераторов типа ЭЧСР, которое включило в себя функции исполнительной части не только системы противоаварийной автоматики, но и системы АРЧМ электростанции и противоразгонной защиты турбины. ЭЧСР реализует функции турбинного регулятора в нормальных режимах работы энергоблока, алгоритмы аварийного управления мощностью для обеспечения динамической устойчивости параллель-

ной работы агрегатов и статистической устойчивости энергосистемы в послеаварийных режимах, функции противоразгонной защиты, режим разворота, синхронизацию и первичное нагружение турбины, а также ряд других дополнительных функций. ЭЧСР внедрена и эксплуатируется до настоящего времени более чем на 40 электростанциях на энергоблоках с паровыми турбинами мощностью 200—1200 МВт. На аналогичных аппаратных средствах был разработан электрогидравлический регулятор скорости для газовой турбины ГТ-100.

Для управления группами агрегатов и электростанциями в ВЭИ были разработаны групповые регуляторы активной мощности гидроэлектростанций, станционные устройства распределения реактивной мощности и групповые регуляторы напряжения, а также общестанционная система управления мощностью тепловой электростанции в нормальных и аварийных режимах.

Кроме того, для Волжской ГЭС на элементах транзисторной логики и операционных усилителях было разработано устройство противоаварийной автоматики УПА.

Комплексный характер работы ВЭИ наиболее ярко проявился при создании Выборгской выпрямительно-инверторной подстанции (ВИП), для которой наряду с силовым электротехническим оборудованием были поставлены средства автоматического регулирования и защиты: регулятор угла погасания вентилей, регулятор тока, регулятор угла зажигания, регуляторы активной и реактивной мощности, комплекс устройств защиты, в том числе защиты фильтрокомпенсирующих цепей. Все эти устройства обеспечили надежную работу оборудования ВИП.

Новый уровень работ ВЭИ по созданию средств автоматизации для энергетики был предreshен появлением первых промышленных микроЭВМ и микроконтроллеров. Применение микроконтроллеров позволило максимально унифицировать технические средства функционально различных устройств управления, обеспечить единство методов контроля и самодиагностики и повысить надежность функционирования, улучшить взаимодействие с оператором и с автоматическими регуляторами более высоких уровней иерархии.

Работы по созданию микропроцессорных систем управления проводились по двум основным направлениям. Одно из этих направлений заключалось в переводе на новую элементную базу традиционных для ВЭИ устройств. На основе разработанных ВНИИЭМ микросредств управляющей вычислительной техники МС УВТ В7 были созданы:

— микропроцессорный регулятор возбуждения сильного действия АРВ СД-М для синхронных генераторов;

— микропроцессорная система управления мощностью турбогенераторов ЭЧСР-М;

— комплекс устройств автоматического управления и регулирования технологическим процессом гидроэлектростанций;

— информационная подсистема в АСУ ТП ГЭС (ГАЭС).

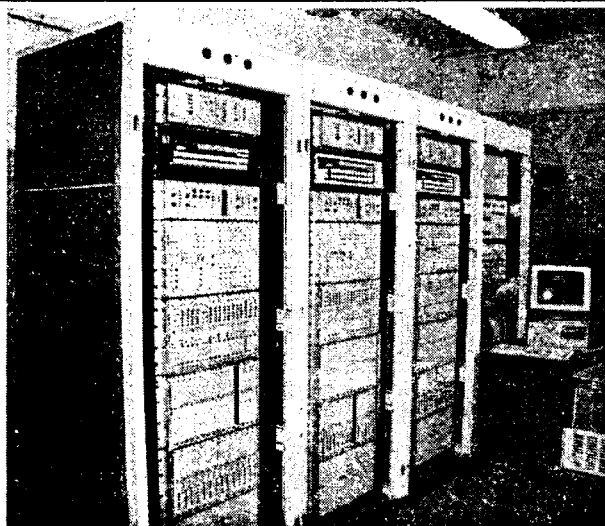


Рис.1. Устройство противоаварийной автоматики ПАА-М

Разработанные устройства внедрены и успешно эксплуатируются на Заинской ГРЭС, Ровенской, Хмельницкой, Южно-Украинской АЭС, Сургутской, Пермской, Березовской ГРЭС, Экибастузской ГРЭС-2, Круониской ГАЭС. На основе ЭЧСР-М путем разработки нового программного обеспечения был создан микропроцессорный регулятор частоты вращения для газовой турбины ГТЭ-150, внедренный на ТЭЦ им. Классона Мосэнерго.

Испытания и внедрение разработанных устройств подтвердили эффективность применения методов прямого цифрового управления энергетическими объектами. Характеристики микропроцессорных регуляторов были существенно улучшены по сравнению с характеристиками аналогичных регуляторов.

Второе направление работ ВЭИ — создание на базе проведенных теоретических исследований новых систем управления, реализация которых на аналоговых элементах была затруднительной.

В соответствии с предложенной ВЭИ многоуровневой иерархической структурой противоаварийной автоматики и комплексом алгоритмов противоаварийного управления было разработано устройство противоаварийной автоматики ПАА-М (рис.1), которое по полиномиальным функциональным зависимостям вычисляет управляющие воздействия и распределяет их между исполнительными устройствами нижнего уровня иерархии. ПАА-М вошло основным составным элементом в общую систему противоаварийной автоматики и было введено в эксплуатацию в ОЭС Поволжья на Балаковской АЭС, Заинской ГРЭС и Волжской ГЭС, а также на подстанции "Киндери". Внедрение ПАА решило задачу обеспечения устойчивости объединенной энергосистемы Поволжья.

Кроме того, с применением МС УВТ В7 была разработана микропроцессорная система управления для перспективного источника реактивной мощности — статического компенсатора для металлургии и для энергетики.

Опыт более чем десятилетней эксплуатации микропроцессорных устройств автоматики подтвердил их полное соответствие техническим требованиям, предъявляемым к устройствам такого назначения, в том числе в отношении надежности и помехозащитности.

Вместе с тем в достаточно короткий срок стало ясно, что МС УВТ В7 имеет ограниченные возможности в части производительности и объемов памяти, что затрудняло дальнейшее развитие работ по созданию систем управления на основе усовершенствованных алгоритмов для сложных технологических объектов.

Поэтому в ВЭИ были разработаны собственные микропроцессорные вычислительные контроллеры, ориентированные на применение в составе систем управления энергообъектами.

На основе новых контроллеров было разработано следующее поколение средств автоматизации:

- устройство управления мощностью турбоагрегатов ЭЧСР-М2; технические средства ЭЧСР-М2 обеспечили возможность управления частотой вращения и мощностью как конденсаторных, так и теплофикационных паровых турбин и парогазовых энергетических установок; ЭЧСР-М2 введена в эксплуатацию на Северо-Западной ТЭЦ, на Минской ТЭЦ-5, на трех электростанциях КНР и в Иране;

- система автоматического управления возбуждением асинхронизированного турбогенератора СУВМ-АС; СУВМ-АС внедрена в эксплуатацию на агрегатах Бурштынской ГРЭС;

- микропроцессорный автоматический синхронизатор АС-М, широко внедряемый в настоящее время в России и за рубежом;

- система автоматического управления электрооборудованием перспективного экологически чистого источника электроэнергии — ветроэнергетической установки (СУЭМ-Р1).

В последние годы в ВЭИ на основе совершенствования средств микроэлектроники, появления на отечественном рынке новых быстродействующих микроконтроллеров, развития коммутационных сетей разработана новая современная серия устройств автоматики.

Для четвертого преобразовательного блока Выборгской ВИП разработан комплекс микропроцессорных устройств управления, регулирования и защит выпрямительно-инверторного преобразовательного блока. Для повышения надежности функционирования устройств управления программно-аппаратный комплекс выполнен резервированным по мажоритарному принципу "два из трех".

Перспективы значительных объемов внедрения имеет разработанный совместно с АО "Электросила" автоматический регулятор возбуждения синхронных генераторов АРВ-М, который включен составной неотъемлемой частью в системы управления генераторов различной мощности.

Широкое внедрение в ВЭИ получили работы по созданию системы регистрации параметров аварийных режимов электрооборудования. Эта система строится как иерархическая структура, в которой устройства

сбора информации и регистрации объединяются аварийной коммуникационной сетью под управлением инженерной станции.

Регистраторы аварийных параметров типа БАРС могут работать как в составе системы, так и автономном режиме. В настоящее время устройства регистрации внедрены на ТЭЦ-27 Мосэнерго, Волжской ГЭС, Выборгской ВИП и на ряде других объектов.

Проведены работы по созданию интегрированной АСУ ТП для гидроэлектростанций. Разработанная АСУ ТП ГЭС имеет распределённую двухуровневую структуру.

Верхний уровень включает в себя:

- подсистему представления информации оперативному персоналу на базе современных графических SCADA-систем;

- подсистемы группового регулирования активной мощности, общестанционного регулирования напряжения и выбора состава работающих агрегатов;

- подсистему противоаварийной автоматики;

- подсистему регистрации и анализа аварийных режимов;

- подсистему коммерческого учёта электроэнергии;

- подсистему связи с вышестоящим уровнем управления.

Нижний уровень АСУ ТП содержит:

- подсистему сбора и обработки информации;

- подсистему регулирования частоты вращения и мощности агрегата;

- подсистему технологической автоматики;

- подсистему контроля и технической диагностики агрегата;

- подсистему регистрации параметров аварийных режимов агрегата.

Для реализации структуры АСУ ТП ГЭС в ВЭИ разработаны микропроцессорные средства автоматизации энергетических комплексов (МС АЭК), освоенные производством АО ЧПЗ "Элара" (г. Чебоксары). В настоящее время осуществляется внедрение АСУ ТП разработки ВЭИ на Волжской ГЭС им. В. И. Ленина и на Чебоксарской ГЭС.

Для модернизированной АСУ ТП Выборгской ВИП в ВЭИ разработана система непрерывного контроля и диагностики силового и вспомогательного оборудования КДСО (рис.2). В составе КДСО выполняются системы мониторинга и диагностики следующего оборудования:

- синхронных компенсаторов реактивной мощности;

- электролизерной установки;

- высоковольтных трансформаторов (в том числе и регулируемых под нагрузкой) и сглаживающих реакторов;

- высоковольтных тиристорных вентилях;

- системы охлаждения преобразовательных мостов.

КДСО имеет трёхуровневую магистрально-модульную структуру. Технические средства КДСО разработаны в ВЭИ. В их число входят интеллектуальные измерительные устройства: микропроцессорный датчик давления и температуры различных сред (например, трансформаторного масла) и сигнализатор горючих

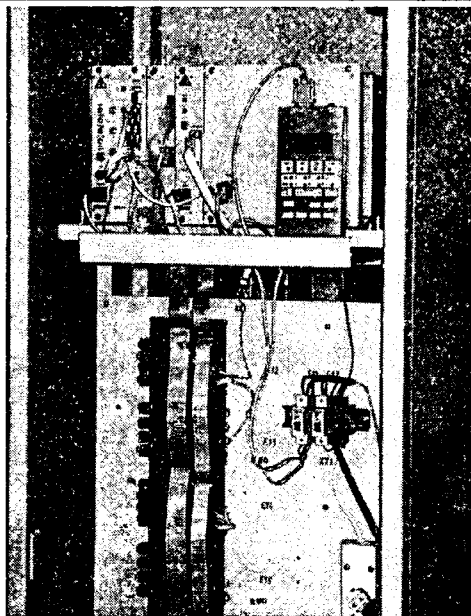


Рис.2. Система непрерывного контроля и диагностики силового и вспомогательного оборудования КДСО

газов, растворённых в масле трансформатора. Аналогичные системы КДСО внедрены на Запорожской АЭС и подстанции "Киндери".

В настоящее время ВЭИ проводит работы по следующим перспективным направлениям автоматизации энергосистем:

- разработка и исследования новых методов комплексного оптимального управления нормальными и аварийными режимами энергосистем на базе современной цифровой технологии обработки и передачи информации, в том числе транспьютерных средств;

- создание на базе микропроцессорной техники интегрированных АСУ ТП электростанций (электрическая часть) и высоковольтных подстанций, при этом все задачи управления, контроля и диагностики электротехнического оборудования как в нормальных, так и в аварийных и послеаварийных режимах работы энергообъекта решаются в комплексе;

- разработка принципов построения распределённых иерархических систем противоаварийного управления протяжёнными энергосистемами на основе методов функционального (кибернетического) моделирования и распараллеливания вычислительных процессов расчёта управляющих воздействий;

- разработка и исследование адаптивных алгоритмов управления режимами энергетических агрегатов.

Принятая ВЭИ концепция построения интегрированной АСУ ТП электростанций (подстанций) включает следующие положения:

- создание широкого набора программно-технических средств и функционально-законченных устройств, ориентированных на применение в АСУ ТП электростанций (подстанций) и позволяющих с помощью настройки реализовать индивидуальные требования каждого процесса управления.

- полный охват функций управления и контроля (в том числе регистрация и анализ аварийных и послеаварийных режимов) и комплексная их реализация в рамках единой системы (целостное комплексное решение);

- синхронизация по времени событий в различных устройствах АСУ и ведение системы единого времени, в том числе с использованием систем глобального позиционирования GPS;

- широкое применение интеллектуальных датчиков и модулей ввода/вывода децентрализованной периферии в сочетании с системой промышленной коммутации (полевая шина); при этом обеспечивается перенос периферийных модулей в непосредственную близость к технологическому процессу;

- создание широкой номенклатуры модулей ввода/вывода со значительно расширенным диапазоном функций диагностики;

- обеспечение возможности замены модулей в рабочем режиме;

- применение шины последовательной передачи данных для связи между устройствами управления и сбора информации; возможность реализовывать конфигурации с резервированием на уровне среды передачи данных;

- применяемые технические средства адаптированы к условиям эксплуатации, в частности к электрическим помехам, свойственным электростанциям (подстанциям);

- автоматические функции тестирования и диагностики, мощные средства отслеживания неисправностей, минимальные расходы на эксплуатацию и текущий ремонт;

- гибкость и способность к расширению (возможность дооснастить систему новыми функциями, расширить сеть новыми линиями связи);

- структура АСУ — иерархическая распределенная, сопоставимая с пирамидой задач управления;

- обеспечение возможности со стороны оператора быстрого, простого и надежного управления станцией; жизненно важная информация накапливается в центральных пунктах;

- подсистемы визуализации и контроля в центральных диспетчерских пунктах реализуются на базе мощных персональных компьютеров и локальной вычислительной сети Ethernet; в качестве сетевой операционной системы применяется Windows NT фирмы "Microsoft"; функции АРМов оперативного и административно-хозяйственного управления, автоматического формирования отчетной документации, ведения архивов данных оперативного и длительного хранения реализуются средствами современных SCADA-систем с архитектурой "клиент-сервер";

- взаимодействие устройств управления и сбора данных разработки ВЭИ со SCADA-системой осуществляется на базе стандартных интерфейсов, в том числе OPC-серверов;

- визуализация и контроль процессов осуществляется при помощи средств, имеющих одинаковую пользовательскую оболочку как в централизованных диспетчерских пунктах, так и непосредственно около управляющих устройств; при создании пользовательского интерфейса этих систем используется многолетний практический опыт эксплуатации систем верхнего уровня иерархии;

- проектирование всего аппаратного и программного обеспечения систем управления осуществляется в рамках системы инжиниринга; при этом используется единая база данных, что позволяет исключить двойной ввод/вывод одной и той же информации; возможна автоматическая генерация на основе типичных конфигураций; система имеет встроенные средства тестирования конфигураций;

- создание единого информационного пространства АСУ ТП и АСУ П.

При создании верхнего уровня управления АСУ ТП (АРМы оперативно-диспетчерского и административно-хозяйственного персонала, архивы данных оперативного и длительного хранения информации, серверы документирования) ВЭИ используются локальные вычислительные сети Ethernet и программные продукты современных графических SCADA-систем, в частности 32-разрядной графической SCADA системы Trase Mode версии 5.x для Windows NT разработки фирмы "AdAstra" (Москва). Для передачи информации между устройствами управления и сбора информации нормального и аварийного режимов применяются промышленные сети типа Bitbus и CAN, а также сетей на базе интерфейса RS-485 и протоколов собственной разработки.

С появлением в последнее время на отечественном рынке новых высокопроизводительных средств автоматизации зарубежного производства ВЭИ в своих разработках при построении устройств стал все более широко применять некоторые импортные средства автоматизации: отдельные функционально законченные блоки или узлы (процессорные модули, блоки питания, преобразователи сигналов), средства для организации диалога с оперативным и обслуживающим персоналом, наиболее ответственные электромеханические компоненты (разъемы, клеммники).

При создании устройств управления, контроля и диагностики ВЭИ традиционно осуществляет разработку и организацию серийного изготовления на заводе функционально-законченных устройств. При этом особое внимание при разработке уделяется условиям эксплуатации устройств и требованиям по надежности, помехозащищенности, ремонтпригодности, удобству эксплуатации. Для реализации наиболее ответственных функций, таких, например, как защита электротехнического оборудования или противоаварийное управление, при построении устройств осуществляется резервирование аппаратуры. В настоящее время базовым заводом-изготовителем устройств управления для ВЭИ является АО ЧПЗ "Элара".

Новые разработки ВЭИ в области вакуумных дугогасительных камер

БЕЛКИН Г.С., ЛУКАЦКАЯ И.А., ПЕРЦЕВ А.А., РОМОЧКИН Ю.Г.

Изложены результаты разработок ВЭИ им. В.И. Ленина нового поколения вакуумных дугогасительных камер с номинальными напряжениями 10 и 35 кВ и номинальными токами отключения 10—40 кА. Описан принцип работы новых контактных систем с аксиальным магнитным полем, разработанных для нового поколения камер, позволивших значительно уменьшить массы и диаметры камер.

В настоящее время вакуумные выключатели занимают лидирующее положение в силовоточной коммутационной аппаратуре средних классов напряжения 10—35 кВ. Их достоинства: высокие надежность и ресурс, малые масса и габариты, сейсмостойкость, способность работать в любых климатических районах, взрыво- и пожаробезопасность, простота обслуживания — снискали всеобщее признание. Параметры вакуумного выключателя определяются основным элементом его конструкции — вакуумной дугогасительной камерой. В России в ВЭИ им. В.И. Ленина [1,2], как и в ведущих фирмах [3,4] развитых зарубежных стран, ведутся непрерывные исследования и разработки, направленные на повышение параметров, расширение номенклатуры и уменьшение массы и габаритов вакуумных дугогасительных камер. За последние два десятилетия достигнуты значительные успехи в конструкции и технологии изготовления камер. Созданы механически прочные, термостойкие, надежные, с легкими металлическими манжетами изоляционные корпуса камер. Однако главным элементом конструкции, влияющим на массогабаритные показатели, является контактная система, от которой зависит диаметр камер. При токах 10 кА и более конструкцией контактной системы задается такое магнитное поле, при взаимодействии с которым дуга отключения гаснет при переходе переменного тока через нуль. В современных вакуумных дугогасительных камерах используются контактные системы двух типов: с поперечным (радиальным) и продольным (аксиальным) по отношению к току дуги отключения магнитными полями. В контактных системах с радиальным магнитным полем дуга отключения вращается по поверхности контактов, предотвращая их локальный перегрев. В контактных системах с аксиальным магнитным полем за счет уменьшения поперечного коэффициента амбиполярной диффузии электронов и ионов и эффекта обратного движения катодных пятен в магнитном поле [5] падение напряжения в дуге отключения в несколько раз меньше, чем в контактных системах с радиальным магнитным полем, и дуга распространяется практически по всей поверхности контактов. Контактные системы обоих типов непрерывно совершенствуются с целью повышения их отключающей способности [3, 4, 6—8], однако лучших результатов в этом направлении удастся добиться в камерах с контактными системами с аксиальным магнитным полем.

В настоящей статье приведены данные о новых поколениях вакуумных дугогасительных камер на напряжения 10 и 35 кВ и номинальные токи отключения более 10 кА с контактными системами с аксиальным магнитным полем, разработанных в ВЭИ им. В.И.Ленина.

Вакуумные дугогасительные камеры с номинальным напряжением 10 кВ

ВЭИ им. В.И. Ленина каждые 4—5 лет обновляет серию вакуумных дугогасительных камер на напряжение 10 кВ. В последнем десятилетии выпускалась серия камер с номинальными токами отключения 10—40 кА, номинальными токами 630—3150 А, механическим и коммутационным ресурсом 25000—50000 циклов ВО. Всего за этот период было изготовлено и установлено в эксплуатацию в различных областях народного хозяйства: в энергетике, на железнодорожном транспорте, в метрополитене, в металлургической промышленности и других областях более 300000 камер. Камеры ВЭИ им. В.И. Ленина имеют технологичную конструкцию, изготавливаются из отечественных материалов по воспроизводимой технологии, поэтому в короткие сроки было освоено их серийное производство рядом предприятий ВПК. Они хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации и подтвердили все известные положительные качества вакуумных выключателей.

За последние 5 лет в ВЭИ им. В.И. Ленина было разработано новое поколение вакуумных дугогасительных камер на 10 кВ, параметры которых приведены в табл.1. Для нового поколения камер разработаны оригинальные конструкции контактных систем [6] с аксиальным магнитным полем, позволившие существенно улучшить массогабаритные показатели камер. Динамика изменения массы и габаритов камер от поколения к поколению показана на примере камеры на 10 кВ, 20 кА, 1600 А на рис.1, из которого видно, что камера нового поколения (2000 г.) имеет в 2 раза меньший диаметр и более чем в 3 раза меньшую массу по сравнению с камерой 1-го поколения (1978 г.). На рис.2 приведена осциллограмма отключения тока 20 кА при возвращающемся напряжении 11,5 кВ вакуумным выключателем, укомплектованным камерами КДВА5-10-20/1600 УХЛ2, из которого видно, что камеры успешно справляются с отключением номинального тока при большом, выше нормированного, процентном содержании аperiodической составляющей.

Типовая конструкция камеры показана на рис.3. Камера содержит изоляционный корпус, экранную и контактные системы с токовводами. Изоляционный корпус состоит из двух изоляторов 1, 2 из высокоглиноземистой керамики. Для обеспечения электрической прочности камер в условиях выпадения росы внешняя поверхность изоляторов снабжена ребрами. С торцов корпус армирован металлическими манжетами 3, 4, к которым приварены металлические фланцы 5, 6. Экранная система состоит из трех экранов, из которых один центральный 7 изолирован от токовводов и находится под свободным потенциалом. Он

Технические данные	КДВА-10-16/1000 УХЛ2	КДВА5-10-20/1600 УХЛ2*	КДВА-10-25/1600 УХЛ2	КДВА-10-31,5/2000 УХЛ2	КДВ2-10-40/1600 УХЛ2**	КДВ-10-40/3150 УХЛ2**
Электрические характеристики						
Номинальное напряжение, кВ	10	10	10	10	10	10
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12	12	12	12	12	12
Номинальная частота, Гц	50—60	50—60	50—60	50—60	50—60	50—60
Номинальное испытательное напряжение, кВ						
— промышленной частоты, одномоментное	42	42	42	42	42	42
— грозового импульса (полного, наибольший пик)	75	75	75	75	75	75
Номинальный ток, А	1000	1600	1600	2000	1600	3150
Номинальный ток отключения, кА	16	20	25	31,5	40	40
Трехсекундный ток термической стойкости, кА	16	20	25	31,5	40	40
Ток включения (наибольший пик), кА	41	51	64	80	102	102
Нормированное процентное содержание аperiodической составляющей, %	35	35	35	50	40	40
Механические характеристики						
Дополнительное контактное нажатие, не менее, Н	600	800	1600	2500	4500	4500
Ход подвижного контакта, мм	6	6	8	8	10	10
Средняя скорость хода подвижного контакта при отключении, м/с	1,0-1,9	1,0-1,9	1,0-1,9	1,0-1,9	1,5-2,0	1,5-2,0
Средняя скорость хода подвижного контакта при включении, м/с	0,5-0,9	0,5-0,9	0,5-0,9	0,5-0,9	0,5-0,9	0,5-0,9
Ресурс и другие характеристики						
Механический ресурс, операции ВО	75000	50000	60000	50000	50000	50000
Коммутационный ресурс, операции ВО:						
— при номинальном токе	50000	50000	40000	30000	40000	5000
— при номинальном токе отключения	50	30	40	50	50	50
Износ контактов, не более, мм	2	2	3	3	3	3
Электрическое сопротивление на постоянном токе при нормированном контактом нажатии, не более Ом $\times 10^{-6}$	60	50	30	20	15	12
Масса камеры, не более, кг	3,0	3,0	4,0	5,7	7,5	9,5
Срок службы, лет	30	30	30	30	30	30
Габаритные размеры изоляционного корпуса, мм						
— высота	171	171	171	171	171	171
— внешний диаметр	76	76	102	125	125	125
* Расшифровка обозначения камеры: К — камера, В — вакуумная, Д — дугогасительная, А — аксиальное магнитное поле, 5 — номер поколения, 10 — номинальное напряжение, кВ, 20 — номинальный ток отключения, кА, 1600 — номинальный ток, А, УХЛ — эксплуатация в умеренном и холодном климатах, 2 — допускается эксплуатация под навесом и в неотопляемых помещениях.						
** Разработка камер завершается						

защищает внутреннюю поверхность изоляторов от металлизации продуктами эрозии контактов, генерируемой дугой отключения: Два концевых экрана 8, 9, находящихся под потенциалами токовводов 10, 11, предназначены для уменьшения напряженности электрического поля на спаях изоляторов с металлом внутри камеры. Они также защищают внутреннюю поверхность изоляторов от металлизации атомами и частицами материала контактов, отраженными от

фланцев 5, 6 и других поверхностей. Токовводы камеры медные. Их диаметр определяется ударными усилиями, возникающими при протекании сквозных токов, и значением номинального тока. Один из токовводов 11 подвижный и соединяется с корпусом камеры через сильфон 12, который экраном 13 защищен от прожога брызгами материала контактов, возникающими при горении дуги отключения. К токовводам припаяны контакты 14, 15.

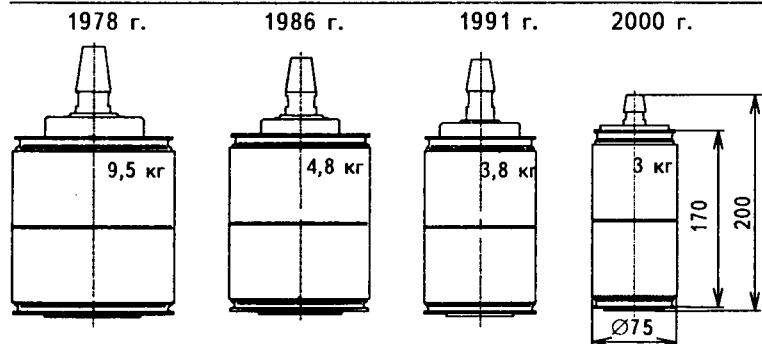


Рис.1. Массы и схематические габаритные чертежи вакуумных дугогасительных камер разных поколений, разработанных ВЭИ им. В.И.Ленина, с параметрами: номинальное напряжение 10 кВ, номинальный ток отключения 20 кА, номинальный ток 1600 А

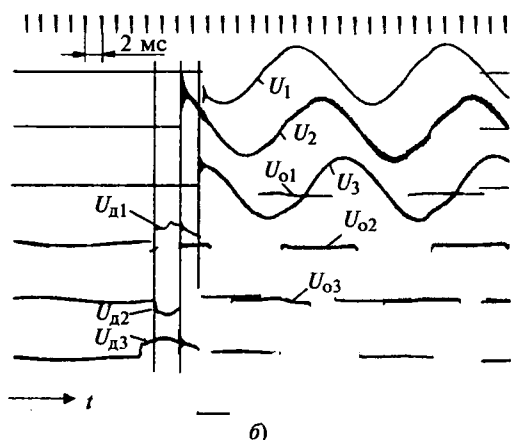
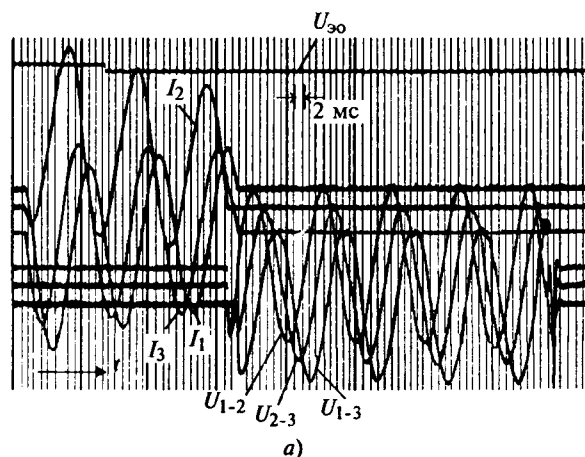


Рис.2. Осциллограммы отключения тока 20 кА трехполюсным выключателем с камерами КДВА5-10-20/1600 УХЛ2 (содержание аперриодической составляющей во 2-м полусе +57%):

а — шлейфовый осциллограф; б — электронный осциллограф с механической разверткой; $I_{1,2,3}$ — отключаемые токи в 1-м, 2-м и 3-м полюсах; $U_{1-2}, U_{2-3}, U_{1-3}$ — возвращающиеся напряжения между полюсами 1-2, 2-3 и 1-3; U_1, U_2, U_3 — возвращающиеся напряжения на выводах 1-, 2- и 3-го полюсов; $U_{д1}, U_{д2}, U_{д3}$ — напряжения на дугах отключения 1-, 2- и 3-го полюсов; $U_{о1}, U_{о2}, U_{о3}$ — напряжения на выходах катодных повторителей, входы которых подключены параллельно к ограничителям напряжений и заземленным плечам делителей напряжения, применявшихся для осциллографирования напряжений на дугах в 1-, 2- и 3-м полюсах; U_{30} — напряжение на выводах катушки электромагнита отключения привода выключателя

Новые контактные системы с аксиальным магнитным полем разработаны в двух вариантах. В первом варианте оба контакта, подвижный и неподвижный, имеют одинаковую конструкцию. Конструкция контактов первого варианта показана на рис.4. Каждый контакт содержит накладку 1 из хромомедной композиции с содержанием хрома 30 или 50% и индуктор 2, имеющий от 2 до 4 секций. Каждая секция содержит отрезок кольца 3, который одним концом соединяется с накладкой 1, а другим через плечо 4 с токовводом 5. Отключаемый ток I из токовводов разветвляется по секциям индуктора и протекает по отрезкам колец обоих контактов в одном направлении. Тем самым создается аксиальное магнитное поле, параллельное току дуги. Для уменьшения вихревых токов контактная накладка содержит щели 6, число которых равно числу секций индуктора. В отличие от контактных систем подобного типа в новой серии камер контакт содержит ферромагнитный сердечник 7 с радиальными пазами, которые необходимы для уменьшения вихревых токов. Введение сердечника позволило уменьшить сопротивление контактов, что дало возможность увеличить номинальный ток камер и обеспечить более равномерное, чем в аналогичных контактных системах, распределение аксиального магнитного поля по поверхности контактов непосредственно после их замыкания, когда ток дуги сосредоточен в 1–3 каналах и распределен несимметрично относительно оси контактов. Это видно из рис.5, на котором приведена зависимость аксиальной составляющей вектора индукции магнитного поля в межконтактном промежутке от азимутального угла φ для двух четырехсекционных

контактов. Это видно из рис.5, на котором приведена зависимость аксиальной составляющей вектора индукции магнитного поля в межконтактном промежутке от азимутального угла φ для двух четырехсекционных

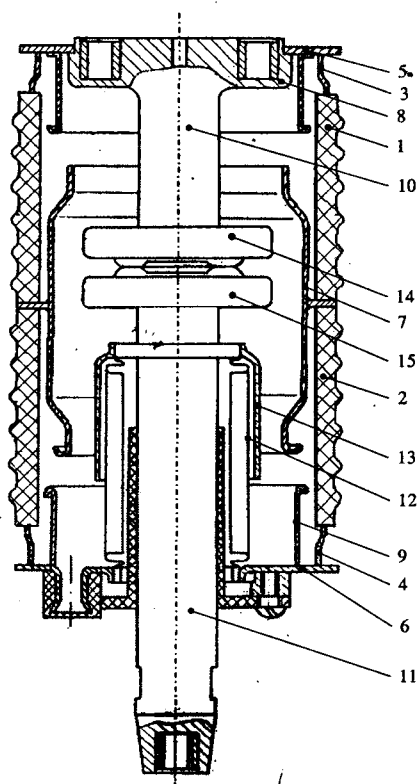


Рис.3. Типовая конструкция вакуумной дугогасительной камеры с номинальным напряжением 10 кВ

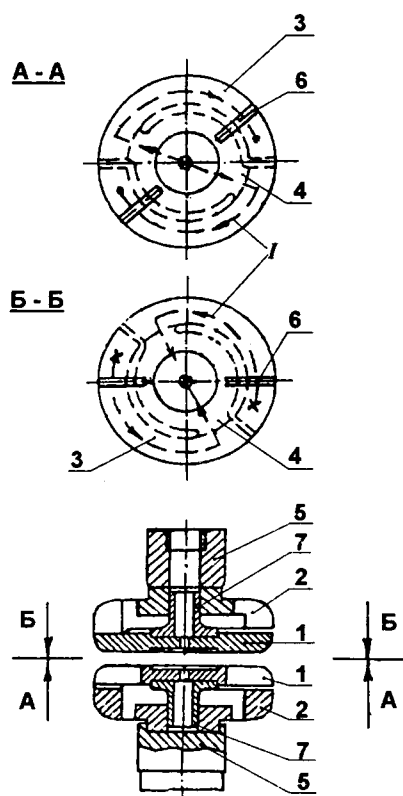


Рис.4. Конструкция контактов с ферромагнитными сердечниками

контактных систем диаметром 10 см, в одной из которых имеется ферромагнитный сердечник, в другой — отсутствует. Распределение аксиального магнитного поля измерено для случая, когда ток дуги между контактами протекает только в одном канале, смещенном относительно оси контактов. Аксиальная составляющая магнитного поля измерялась на переменном токе с помощью индукционного датчика на макетах контактных систем. Между разведенными на 14 мм контактами помещался медный стержень диаметром 10 мм, имитировавший дугу и смещенный относительно оси контактов на 2,5 см. В этом случае сопротивление накладке на пути тока от дуги к индуктору будет меньше вблизи дуги, чем в остальной части накладки. В результате распределение тока по секциям индуктора будет неравномерным. Большая часть тока будет протекать по секциям индуктора, расположенным ближе к каналу тока дуги. Соответственно следует ожидать и неравномерного распределения аксиальной составляющей вектора индукции B_a магнитного поля в межконтактном промежутке. Это и наблюдается на кривой 2 (рис.5) для контактной системы без ферромагнитного сердечника. В то же время в контактной системе с ферромагнитным сердечником при таком же смещении канала тока дуги относительно оси контактов имеет место равномерное распределение B_a по поверхности контактов (кривая 1). Такой ход зависимости $B_a(\varphi)$ объясняется увеличением индуктивного сопротивления каждой секции индуктора из-за введения ферромагнитного сердечника. Вследствие этого неравномерность сопротивления наклад-

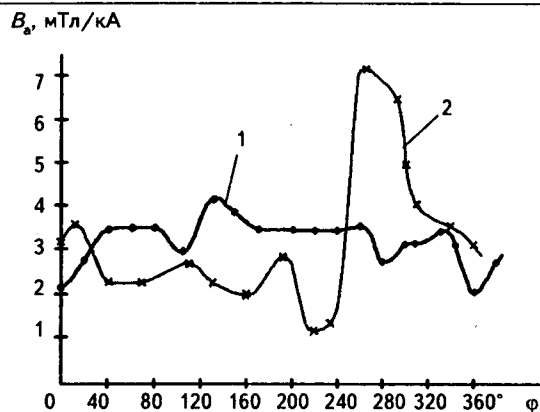


Рис.5. Зависимость аксиальной составляющей вектора индукции магнитного поля от азимутального угла φ на расстоянии 3 см от оси контактов диаметром 10 см с четырехсекционными индукторами с ферромагнитным сердечником (кривая 1) и без него (кривая 2). Стержень, имитирующий дугу, расположен в секторе, ограниченном углами $\varphi=260\div 300^\circ$

ки меньше сказывается на общем импедансе каждой из секций индуктора и на распределении тока по секциям индуктора.

Более равномерное распределение аксиальной составляющей вектора индукции магнитного поля в межконтактном промежутке способствует распространению каналов тока дуги отключения по всей поверхности контактов уже в начальной стадии дуги непосредственно после размыкания контактов, что в конечном счете приводит к увеличению отключающей способности и уменьшению износа контактов.

Второй вариант разработанной контактной системы с аксиальным магнитным полем отличается от традиционных конструкций тем, что рабочей поверхности одного из контактов придана вогнутая форма, другого — выпуклая. Эта конструкция имеет ряд преимуществ по сравнению с контактными системами с плоскими контактными поверхностями.

Известно, что для увеличения отключающей способности контактных систем необходимо увеличение их рабочей поверхности, что обычно осуществляется путем увеличения диаметра контактов и индукторов [3,4], а это приводит к увеличению омического сопротивления контактной системы и уменьшению аксиальной составляющей вектора индукции магнитного поля. Во втором варианте разработанной конструкции увеличение отключающей способности контактов достигается без увеличения их диаметра и без сопутствующих указанных отрицательных факторов. Одновременно уменьшается контактное нажатие, необходимое для предотвращения отброса контактов под действием электродинамического усилия, возникающего при протекании сквозных токов КЗ. Это электродинамическое усилие направлено по нормали к рабочей поверхности контактов и таким образом во втором варианте контактных систем составляет некоторый угол с осью контактов. Отброс контактов может вызвать лишь часть этого усилия, равная его проекции на ось контактов.

Во втором варианте конструкции контактов уменьшается уход нейтральных и заряженных частиц из дуги отключения, так как они встречают на своем пути вогнутую поверхность одного из контактов. Это мо-

жет привести к увеличению концентрации нейтральных и заряженных частиц и, следовательно, к снижению падения напряжения на дуге и уменьшению выделяемой в ней энергии, что также способствует увеличению отключающей способности контактной системы.

Были изготовлены и испытаны вакуумные дугогасительные камеры с контактной системой второго варианта. Их отключающая способность оказалась больше в 1,5 раза, а контактное нажатие меньше в 1,6 раза, чем в камерах с контактной системой того же диаметра, но с плоской контактной поверхностью.

Конструкция, технология изготовления и объём испытаний вакуумных дугогасительных камер, приведенных в табл.1, обеспечивают их надежную работу в течение всего срока службы. Соединение всех деталей камер осуществляется пайкой в защитной среде или в вакууме твердыми припоями или аргонодуговой сваркой. Перед окончательной герметизацией камеры подвергаются длительному высокотемпературному отжигу в высоком вакууме под откачкой, при котором происходит их обезгаживание. После герметизации осуществляется кондиционирование камер коммутациями тока и высоким напряжением. Камеры снабжены газопоглотителем, который связывает газы, выделяющиеся при кондиционировании и коммутациях тока. Хорошо связывают газы и атомы хрома, испаряющиеся с поверхности контактов при горении дуги отключения. Это позволяет поддерживать в камерах высокий вакуум в течение всего срока службы. В процессе производства камеры проходят приемо-сдаточные, периодические и типовые испытания, в том числе при нормированном коммутационном цикле АПВ-0-0,3 с -ВО-20 с -ВО по ГОСТ 687-78 [9]. В промежутках между периодическими и типовыми испытаниями камеры испытываются неоднократно в составе вакуумных выключателей, которые проходят сертификацию. Все

это позволяет постоянно осуществлять контроль качества камер в процессе производства.

Камеры, приведенные в табл.1, и выключатели, в которых они применяются, изготавливаются на предприятии ГНПП "Контакт" (г. Саратов) и других предприятиях России и находятся в эксплуатации в различных областях народного хозяйства.

Вакуумные дугогасительные камеры с номинальным напряжением 35 кВ

Сведения о разработанных ВЭИ на конец 2000 г. камерах на 35 кВ и камеру на 25 кВ для однополюсных выключателей электропоездов приведены в табл.2. Сравнение с разработками 80-х годов [1] показывает, что число типоразмеров камер на этот класс напряжения пополнено камерами типов КДВ-25-10/800 и КДВ-35-16/1600 на номинальные токи отключения соответственно 10 и 16 кА. Вместо выпускавшихся ранее камер с номинальными токами отключения 20 и 31,5 кА разработаны новые камеры типов КДВ-35-25/1600 для выключателей с токами отключения 20 и 25 кА, и КДВ-35-40/2500 для выключателей с токами отключения 31,5 и 40 кА. При увеличенных номинальных токах отключения масса камер новых типов уменьшена на 4 кг по сравнению с соответствующими типоразмерами камер старых типов, на 20 мм уменьшены наружные диаметры корпусов новых камер. В целом по массогабаритным показателям новые камеры типа КДВ-35 соответствуют лучшим зарубежным образцам, превосходя их на 10—35% по значениям испытательных напряжений.

С камерами КДВ-35 (табл.2) на заводах России выпускаются и проектируются вновь вакуумные выключатели на класс напряжения 35 кВ на номинальные токи от 1250 до 2500 А при номинальных токах отключения от 12,5 до 40 кА общепромышленного на-

Таблица 2

Наименование параметра	Типоразмеры ВДК			
	КДВ-25-10/800*	КДВ-35-16/1600	КДВ-35-25/1600	КДВ-35-40/2500
Номинальное напряжение, кВ	25	35		
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	29	40,5		
Номинальный ток отключения, кА	10	12,5; 16	20; 25	31,5; 40
Номинальный ток, А	400; 630; 800	1250; 1600	1250; 1600	2000; 2500
Трехсекундный ток термической стойкости, кА	10	16	25	40
Циклы АПВ	О-0,3 с - ВО - 20 с - ВО			
Испытательное напряжение промышленной частоты, одноминутное, кВ	80	95		
Испытательное напряжение полного грозового импульса, кВ	150	190		
Ресурс при номинальном токе отключения: циклы ВО, операции О	100 ВО	100 ВО	30 ВО +70 О	30 ВО +70 О
Ресурс при номинальном токе, тысяч циклов ВО	60	20	25 (60**)	20
Механический ресурс, циклов ВО	60	25	25 (60**)	20
Ход подвижного контакта, мм	13,5±0,5	16,5±0,5	16,5±0,5	17,5±0,5
Диаметр корпуса, мм	110	136	150	166
Масса, кг	7	8,7	10,6	16,5
Срок службы, лет	25			

* — Камера для выключателей электропоездов.
 ** — Указанный ресурс может быть реализован при номинальном токе не более 1250 А и ходе подвижного контакта 13,5 мм в выключателях для электротермических установок или при последовательном соединении нескольких камер в полюсе выключателя.

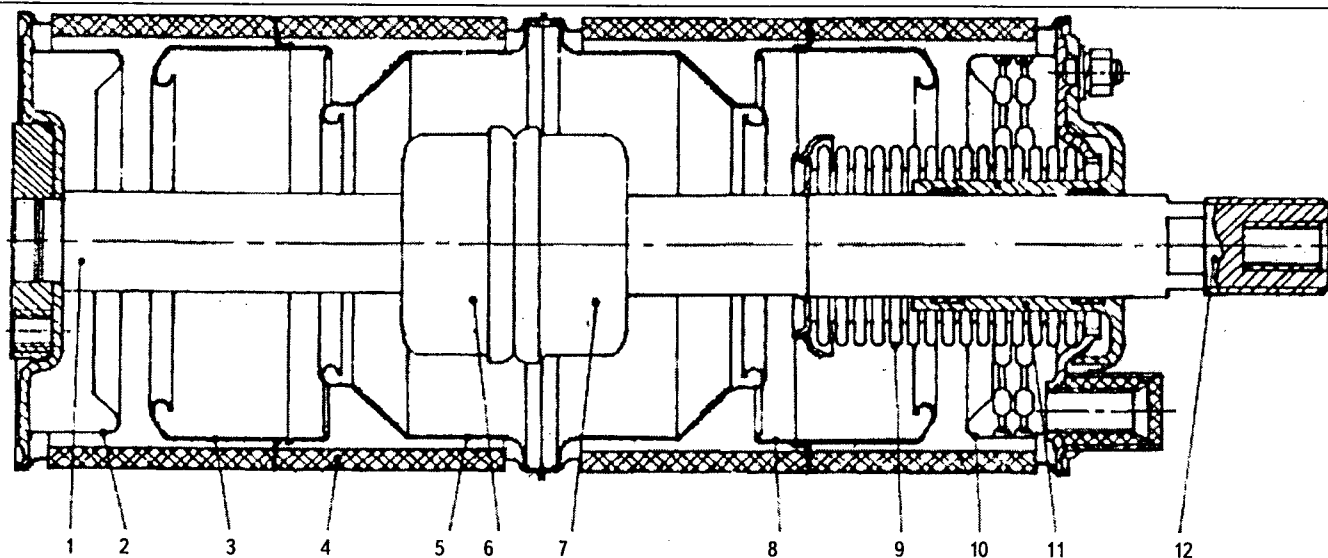


Рис.6. Схематический разрез камеры на 35 кВ:

1, 12 — токоподводы; 2, 10 — экраны, находящиеся под потенциалом контактов; 3, 5, 8 — экраны, находящиеся под плавающим потенциалом; 4 — корпус; 6, 7 — возбуждающие продольное магнитное поле дугогасящие контакты; 9 — сифон; 11 — направляющая

значения и специальные. Коммутационный и механический ресурсы этих выключателей при необходимости могут быть доведены до 20 тыс. циклов ВО без замены камер. Этим предопределяется возможность многолетней работы выключателей практически без обслуживания. Основным требованием к выключателям для частых коммутационных операций является обеспечение коммутационного ресурса 100 тыс. циклов для выключателей на 35 кВ и 40 тыс. циклов для аппаратов на 110 кВ.* Камеры для этих выключателей должны обладать коммутационным ресурсом при рабочем токе не менее 50 тыс. циклов. При этом условии обеспечивается высокая экономическая эффективность от использования вакуумного выключателя. Как видно из табл.2, камера типа КДВ-35-25/1600 обладает механическим ресурсом 60 тыс. циклов. Это значение ресурса получено за счет уменьшения с 16,5 до 13,5 мм хода подвижного контакта с соответствующим уменьшением скорости. При этом отключающая способность камеры практически не уменьшается, что обусловлено конструкцией контактов согласно изобретению [7]. Сопутствующее уменьшению хода контакта возрастание вероятности возникновения повторных пробоев также не является препятствием, поскольку при коммутации таких потребителей, как электротермические установки, увеличение числа повторных пробоев в полюсе выключателя не приводит к осложнениям. При коммутации камерой КДВ-35-25/1600 рабочего тока в пределах до 1250 А её коммутационный ресурс, как и механический, составляет 60 тыс. циклов. При больших токах ресурс снижается по причине износа контактов сверх допустимых 3 мм. Таким образом, в выключателях для частых коммутационных операций на 35 кВ с номинальным током до 1250 А, номинальным током отключения до 25 кА с коммутационным ресурсом 100 тыс. циклов должна производиться однократная замена камер после выра-

ботки 50-60 тыс. циклов. Выключатели на 110 кВ позволяют выполнить 40 тыс. циклов без замены камер. В настоящее время эксплуатируются выключатели на 110 кВ с номинальным током отключения до 20 кА с камерами КДВ-35-25/1600 и с номинальным током отключения до 31,5 кА с камерами КДВ-35-40/2500. Однополюсные выключатели для электровозов на напряжение 27,5 кВ с камерой КДВ-35-25/1600 имеют коммутационный и механический ресурсы по 60 тыс. циклов без замены камеры и обеспечивают пробег электровозов до капитального ремонта без замены выключателя. Такой же коммутационный ресурс однополюсного выключателя на 27,5 кВ для электропоездов обеспечивается камерой КДВ-25-10/800 при номинальном токе до 800 А и номинальном токе отключения до 10 кА.

В конструкции камер, приведенных в табл.2, сохранены хорошо зарекомендовавшие себя принципиальные решения, примененные в камерах на 35 кВ первого поколения, выпускавшихся промышленностью страны с 1982 г. [10]. К этим решениям относятся четырехсекционный изоляционный корпус камеры и контактная система, возбуждающая в межконтактном промежутке в процессе отключения тока КЗ продольное магнитное поле с усиленной индукцией. На рис.6 дан схематический разрез одного из типоразмеров камеры табл.2. Четыре секции изоляционного корпуса 4 образованы керамическими кольцами и закрепленными на них экранами 3, 5 и 8, находящимися под плавающими потенциалами, и двумя прифланцевыми экранами 2 и 10, соединенными электрически с дугогасящими контактами 6 и 7. Использование четырехсекционных корпусов в камерах ВЭИ вместо двухсекционных в камерах на 36 кВ, разработанных за рубежом, обусловлено на 10—35% более высокими испытательными напряжениями, которые согласно существующим нормам, должны выдерживать выключатели, выпускаемые и эксплуатируемые в России. 20-летний опыт эксплуатации десятков тысяч камер типа КДВ-35 с четырехсекционными корпусами в выключателях на 35 кВ общепромышленного и специаль-

* В каждом из полюсов на 110 кВ используются до четырех соединенных последовательно камер.

ного назначения не выявил ни одного случая перекрытия внутренней изоляции камер с необратимой утратой их работоспособности.

Длина пути утечки по внешней стороне изоляционного корпуса камеры недостаточна для удержания испытательных напряжений и не может быть увеличена по экономическим основаниям. Поэтому внешняя изоляция камеры требует обязательного усиления. Метод усиления обуславливается конструкцией выключателя. Допускается размещение камер в жидких или газообразных диэлектриках, а также путем нанесения на их корпуса твердого диэлектрика.

Все типополнения камер КДВ-35 (табл.2) характеризуются оригинальной конструкцией дугогасительных контактов 6, 7 [7,11]. Оба контакта полностью идентичны один другому. Они содержат обтекаемые отключаемым током двухзаходные индукторы, возбуждающие в межконтактном промежутке магнитное поле, удельное значение продольной (аксиальной) составляющей которого достигает 10 мТл/кА. Это примерно вдвое превышает так называемое оптимальное значение, которое для близких по размерам контактов составляет 4 мТл/кА [12] и при котором имеет место минимум напряжения дуги. Обращенные в сторону противоположного контакта поверхности индукторов имеют дугостойкое хромомедное покрытие. Через это покрытие контакты смыкаются один с другим во включенном положении выключателя, между этими же поверхностями горит дуга отключения. Индукторы, таким образом, не только возбуждают магнитное поле, но и выполняют функции контактирования и дугогашения. Все это имеет следствием наиболее эффективное управление движением вакуумной дуги во всех её модификациях по поверхностям контактов: короткой контрагированной, образованной в момент размыкания контактов при операции отключения, квазидиффузной (многоканальной), формирующейся в продольном магнитном поле через 2—3 мс после размыкания контактов при токах КЗ, и контрагированной, возникающей при повторных зажиганиях и повторных пробоях [11].

Эффективное управление дугой дало возможность выпустить на рынок страны камеры КДВ-35 и КДВ-25 (табл.2) с высокими потребительскими качествами, давшими возможность:

— в выключателях для частых коммутационных операций уменьшить примерно вдвое против принятых для камер на напряжения класса 36 кВ скорости подвижного контакта — при размыкании до 0,9 м/с; при смыкании до 0,4 м/с и сократить до 13,5 мм ход контакта; в результате механический и коммутационный ресурсы камер при токе 1250 А доведены до 60 тыс. циклов; такие характеристики движения подвижного контакта существенно облегчают решение задачи создания привода и в целом выключателя с ресурсом 100 тыс. циклов;

— получить коммутационный ресурс при номинальном токе отключения не менее 100 операций отключения; для камер с номинальным током отключения до 25 кА, если судить по износу контактов, значение коммутационного ресурса может быть увеличено до 150—200 отключений;

— исключить возможность разрушения дугой экрана вокруг контактов при отключении токов, близких по значению к номинальному току отключения,

наблюдающуюся в некоторых конструкциях камер с контактами с продольным магнитным полем [13];

— при отключении тока, близкого по значению к номинальному току отключения, и размыкании контактов в области амплитуды тока для некоторых конструкций камер наблюдаются случаи неотключения тока при первом после размыкания переходе его через нулевое значение; камеры КДВ-35 в аналогичной ситуации отключают ток при первом переходе через нулевое значение, обуславливая минимальный износ контактов и возможность увеличить сверх сотни отключений коммутационный ресурс при отключении токов КЗ.

Выводы

1. В последние годы в ВЭИ им. В.И. Ленина разработано новое поколение вакуумных дугогасительных камер на номинальные напряжения 10 и 25—35 кВ с номинальными токами отключения 10—40 кА.

2. Для новых поколений камер разработаны три новых вида контактных систем с аксиальным магнитным полем, которые позволили значительно уменьшить массы и диаметры камер, а в камерах на 35 кВ еще и увеличить механический и коммутационный ресурс.

Список литературы

1. Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Перцев А.А. и др. Вакуумные дугогасительные камеры, разработанные ВЭИ им. В.И. Ленина//Электротехника. 1991. №12. С. 9—15.
2. Chaly A.M., Chistjakov S.P., Rakhovsky V.I., Romotchkin Yu.G. Russian vacuum circuit breakers for electrical networks// XVII International Symposium on Discharges and Electrical Insolation in Vacuum, Berkely, California, 1996. P. 1051—1060.
3. Homma M., Somei H., Niwa Y. a.o. Physical and theoretical aspects of new vacuum arc control technology — Self Arc Diffusion by Electrode: SADE//XVIII International Symposium on Discharges and Electrical Insolation in Vacuum, Eindhoven, 1998. P. 415—422.
4. Fink H., Gentsch D., Heimbach M. a.o. New developments of vacuum interrupters based on RMF and AMF technologies// XVIII International Symposium on Discharges and Electrical Insolation in Vacuum, Eindhoven, 1998. P. 463—466.
5. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.
6. Пат. 1700628 РФ. Контактная система для вакуумной дугогасительной камеры/Ю.Г.Ромочкин, С.М.Селикатова, В.Н.Купченко//Открытия. Изобретения. 1991. №47.
7. Пат. №1725681 РФ. Контактная система для вакуумной дугогасительной камеры/А.А.Перцев, С.П.Чистяков//Открытия. Изобретения. 1993. №23.
8. Пат. №2098880 РФ. Контактная система вакуумной дугогасительной камеры/И.А.Лукацкая, С.М.Селикатова, С.Н.Воскресенский//Открытия. Изобретения. 1997. №34.
9. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжении свыше 1000 В. Общие технические требования.
10. Перцев А.А., Гусева Л. Г., Рыльская Л.А. Вакуумные дугогасительные камеры для выключателей на 35 и 110 кВ//Электротехническая промышленность. Серия. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. М: Информэлектро. 1981. Вып. 8 (121). С. 7.
11. Перцев А.А., Рыльская Л.А., Чистяков С.П. Повышение износоустойчивости вакуумных дугогасительных камер при коммутации номинального тока//Электричество. 1995. С. 26—31.
12. Yanabu S, Satoh Y., Tamagawa T. a.o. Ten years experience in axial magnetic field -type Vacuum interrupters". IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. Vol. P.WPD-1, № 4. P.202—208.
13. Shenli J., Jun F., Jing Y. a.o. A Kind of magnetic shield for vacuum interrupters//XVIII International Symposium on Discharges and electrical Insolation in Vacuum, Eindhoven, 1998. P.480—483.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику ВЭИ им. В.И. Ленина Селикатовой С.М., измерившей распределение магнитного поля в контактных системах.

Испытательный центр высоковольтного электрооборудования ВЭИ

КОЗЛОВ В.Б., КОВАЛЕВ В.Д., ОСТАПЕНКО Е.И., ПЕТЕРСОН А.А.

Приведены данные об испытательном центре (ИЦ) высоковольтного электрооборудования Государственного научного центра Российской Федерации "Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина". Даны характеристики испытательных установок ИЦ и показаны основные направления проводимых работ.

Государственный научный центр Российской Федерации "Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина", государственное унитарное предприятие (ГУП ВЭИ), располагает уникальным комплексом испытательных установок и стендов, а также уникальным измерительным оборудованием. Основным направлением использования этих стендов являются испытания электротехнического оборудования высокого и низкого напряжений, предназначенного для электроэнергетических систем и других потребителей, например, для федерального железнодорожного транспорта. ГУП ВЭИ является единственным предприятием на территории России и стран СНГ, где электрооборудование высокого и низкого напряжений может быть испытано в комплексе, т.е. по всем необходимым параметрам, предусмотренным стандартами (другие организации обычно ориентированы на один или несколько видов испытаний). ГУП ВЭИ также располагает рядом специальных установок для физических исследований электрического разряда в газообразных, жидких и твердых диэлектриках, для исследований высокотемпературной сверхпроводимости, прецизионными установками для измерения высокого напряжения, рядом специальных аппаратов для осуществления коммутационных испытаний.

Уже много лет в ГУП ВЭИ действует Испытательный центр высоковольтного электрооборудования (ИЦ), аккредитованный Госстандартом России на техническую компетентность и независимость. Последняя переаккредитация, проведенная комиссией Госстандарта в июне 1999 г., была пятой за истекшие пятнадцать лет.

В соответствии с Положением об испытательном центре, на него возложены следующие функции:

- проведение испытаний закрепленной продукции по закрепленным в аттестате аккредитации видам испытаний;
- совершенствование методов испытаний закрепленной продукции;
- совершенствование испытательного оборудования и средств измерений;
- разработка и участие в разработке программ и методик испытаний, а также нормативных документов на методы испытаний и продукцию в части методов и средств испытаний.

В настоящее время ИЦ ГУП ВЭИ делится на три лаборатории: лабораторию высоких напряжений, лабораторию больших мощностей и лабораторию испытаний систем управления и защиты. В отделении ГУП ВЭИ в г. Истра (ВНИЦ ВЭИ) находится аккредитованная Госстандартом России лаборатория, выполняющая испытания изделий на электромагнитную совместимость.

Лаборатория высоких напряжений включает в себя Большой высоковольтный зал и ряд залов для прове-

дения отдельных видов испытаний изоляции на напряжения от 6 до 500 кВ. Большой высоковольтный зал имеет размеры 60×30×32 м (рис.1), что позволяет испытывать оборудование на классы напряжения до 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока. В нем установлены ГИН 6 МВ (энергия в ударе 380 кДж), каскадный трансформатор 2250 кВ (3×750 кВ, 1А), каскадный генератор постоянного тока 1,2 МВ (ток 500 мА), универсальный делитель напряжения на 4,5 МВ, образцовая система измерений высокого напряжения (система ДВИНА) на напряжения до 800 кВ (точность до 0,01% на постоянном напряжении; 0,1 — 0,3% — на переменном напряжении и коммутационных импульсах). В зале имеются установки, позволяющие проводить испытания изоляционных конструкций под дождем (на классы напряжения до 750 кВ), при загрязнении и увлажнении поверхности (до напряжения 1150 кВ), измерять частичные разряды (ЧР) в изоляции высоковольтных аппаратов и машин при напряжениях до 500 кВ.

В других лабораториях расположены генераторы импульсных напряжений 500, 1200, 1500, 2400 кВ, установки постоянного тока на напряжения 300 кВ (5 мА) и 1200 кВ (50 мА), испытательные трансформаторы на напряжения 100, 200, 350, 750, 1000 кВ.

Такое большое количество различных высоковольтных испытательных установок позволяет проводить одновременно испытания и исследования (в том числе длительные) многих видов оборудования на разные классы напряжения, а также осуществлять сложные испытания с одновременной подачей напряжений от нескольких источников напряжений.

Специальная группа трансформаторов (2×ИОМ-150 и ИОМ-300) позволяет собирать источники переменного напряжения с большими токами короткого замыкания (КЗ), что позволяет проводить высококачественные испытания загрязненных изоляторов при любой поверхностной проводимости увлажненного слоя и максимально возможных диаметрах изоляционной части. Токи КЗ, получаемые от трансформаторов, при питании их от генератора мощностью 2500 кВ·А, приведены в табл.1.

Таблица 1

Параметры испытательных устройств 50 Гц

Наибольшее напряжение, кВ	75	150	300
Ток КЗ, А	67,5	16	17

Для испытания аппаратов с элегазовой изоляцией имеется комплект технологического оборудования, позволяющий проводить вакуумирование изделий, заполнение их элегазом и откачку элегаза после проведения испытаний.

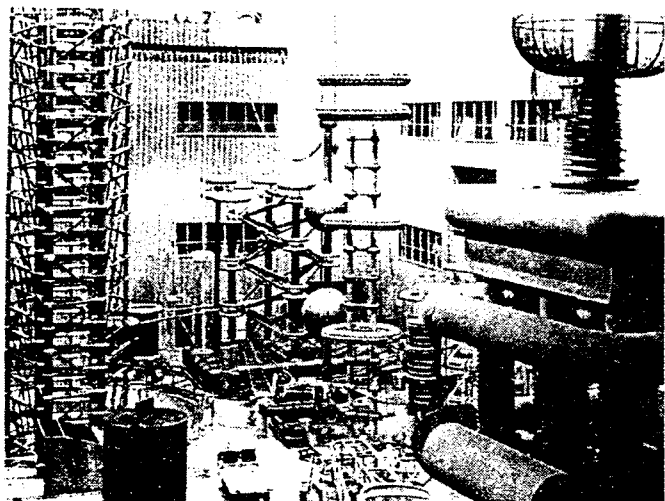


Рис.1. Лаборатория высоких напряжений. Общий вид Большого высоковольтного зала

Специальная камера с вводом на напряжение 1150 кВ позволяет проводить макетирование изоляционных промежутков в элегазе на самые высокие классы напряжения, а также испытывать отдельные элементы КРУЭ путем стыковки этих элементов с камерой.

Для испытания вводов с бумажно-маслянной изоляцией, а также исследования моделей изоляции трансформаторов, имеется технологическое оборудование, предназначенное для обработки трансформаторного масла.

Следует также отметить, что в лаборатории имеется уникальный комплекс оборудования, позволяющий проводить рабочие испытания разрядников и ОПН, когда воспроизводятся все эксплуатационные воздействия на защитный аппарат при возникновении перенапряжений.

Кроме электрических испытаний в лаборатории проводятся исследования механических характеристик изоляторов, а также исследования при одновременном воздействии электрических и механических нагрузок. Такие испытания обеспечиваются вертикальной разрывной машиной 500 кН, горизонтальной разрывной машиной 200 кН, а также специальными нагрузочными устройствами, которые позволяют проводить длительные испытания изоляторов при изменении по требуемому графику механических и электрических нагрузок.

В лаборатории постоянно проводятся работы по совершенствованию испытательных установок и методов испытаний. В настоящее время основное внимание уделяется внедрению компьютерных систем обработки экспериментальных данных.

Вторая лаборатория испытательного центра — это лаборатория больших мощностей, предназначенная для испытаний коммутационной аппаратуры. Специальное подразделение этой лаборатории может проводить климатические, механические испытания аппаратов и испытания их на нагрев в длительном режиме работы.

В лаборатории имеется всё необходимое оборудование для прямых и синтетических испытаний аппаратов на коммутационную способность, на стойкость к сквозным токам КЗ, на локализационную способ-

ность, на взрывобезопасность.

Лаборатория содержит два источника мощности для прямых испытаний, которые как каждый в отдельности, так и при совместной работе, являются источниками тока промышленной частоты при синтетических испытаниях. Имеется источник напряжения для синтетических испытаний, а также дополнительное испытательное оборудование (искусственная короткозамкнутая линия, установка для испытаний на включающую способность, установка для продления времени горения дуги и т.д.), обеспечивающие проведение коммутационных испытаний в соответствии с требованиями государственных стандартов и публикаций МЭК.

Испытательные поля оборудованы в шести железобетонных камерах.

Управление опытами производится с двух центральных (по количеству источников мощности) и двух вспомогательных пультовых помещений.

Компоновка испытательных полей, структура систем управления, а также организационные и технические мероприятия по технике безопасности позволяют проводить испытания одновременно от всех источников мощности.

Источники мощности включают в себя:

- стенд с генератором ТИ-100, мощность КЗ 2500 МВ·А, площадь помещений, занимаемая испытательным оборудованием 936 м² (рис.2);

- стенд с генератором ТИ-12, мощность КЗ 250 МВ·А, занимаемая площадь 500 м².

Часть оборудования — ударные испытательные трансформаторы — расположена на открытых площадках.

Источником напряжения является источник восстанавливающегося напряжения синтетической схемы 100 кА. Энергоёмкость накопителя энергии — 3,0 мДж, площадь 250 м².

Испытательные камеры оборудованы полами, позволяющими надёжно закреплять испытываемые аппараты, грузоподъёмными устройствами; разъединителями безопасности на вводах высокого напряжения. Размеры камер приведены в табл.2.

Подготовка аппаратов к испытаниям проводится в зале подготовки образцов, площадью 200 м², оборудованном грузоподъёмными устройствами. Испытатель-

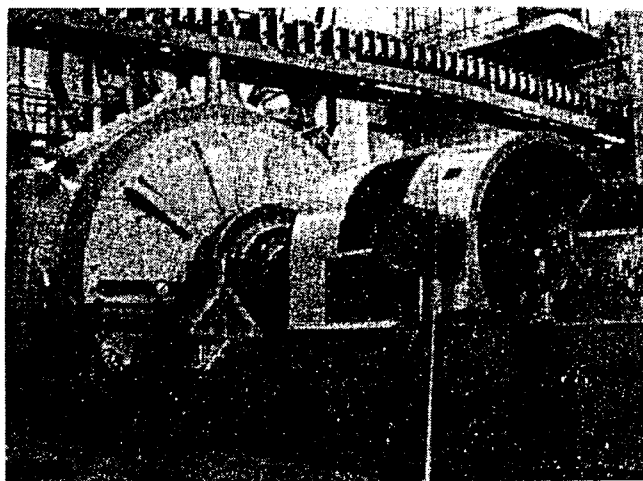


Рис.2. Лаборатория больших мощностей. Ударный генератор ТИ-100

Таблица 2

Размеры испытательных камер лаборатории больших мощностей

№	Размеры в плане, м ²	Высота, м
1	6×9	12
2	9×9	12
3	6×9	12
4	6×6	10
5	6×6	10
6	4×6	5

ный двор, примыкающий к камерам № 1—3 — является основным испытательным полем лаборатории, имеет площадь 400 м².

В лаборатории больших мощностей возможно проведение следующих видов испытаний:

1. Испытания на коммутационную способность:

— прямые испытания на отключающую и включающую способности выключателей на отключение токов до 40 кА (в трехфазном режиме) и 80 кА (в однофазном режиме) при напряжении 10 кВ и при напряжении 35 кВ токов 12,5 и 31,5 кА соответственно;

— синтетические испытания на отключающую способность выключателей на напряжение до 1200 кВ с напряжением на модуль (дугогасительный разрыв или группу разрывов) до 250 кВ и токи отключения до 100 кА;

— прямые трёхфазные и однофазные испытания выключателей на коммутацию конденсаторных батарей при напряжении 12 кВ на отключение токов до 500 А;

— синтетические испытания на отключение ненагруженных линий выключателей на напряжения до 1200 кВ с напряжением на модуль (дугогасительный разрыв или группу разрывов) до 100 кВ.

2. Испытания на стойкость к сквозным токам КЗ — ток электродинамической стойкости до 200 кА, ток термической стойкости до 80 кА.

3. Испытания на локализационную способность.

4. Испытания на взрывобезопасность.

Комплекс испытательного оборудования, предназначенный для климатических и механических испытаний включает в себя:

- климатическую камеру "НЕМА" — объём 8 м³, диапазон температур $-60 \div +300^{\circ}\text{C}$, относительная влажность до 98%, разряжение до 5 мм рт. ст.;

- климатическую камеру "ФОЙТРОН" — объём 0,6 м³, диапазон температур $-75 \div +100^{\circ}\text{C}$, относительная влажность до 98%;

- климатическую камеру КХТ-0,4 — объём 0,4 м³, диапазон температур $-65 \div +155^{\circ}\text{C}$;

- установку вибрационную электродинамическую ВЭДС-1500 — диапазон частот 20—1000 Гц, масса испытываемых изделий до 300 кг;

- стенд имитации транспортирования СИТ-2М — масса испытываемых изделий до 200 кг;

- стенд ударный 12 МУ 50/1470-1 — ускорения до 250 м/с², масса испытываемых изделий до 50 кг.

Указанное оборудование позволяет проводить климатические и механические испытания полностью собранных аппаратов, ячеек КРУ и КСО класса напряжения 10 кВ, отдельных изделий класса напряжения 35 кВ, высоковольтных вводов класса напряжения 110 кВ.

Проведение испытаний оборудования высокого напряжения сопряжено с выполнением измерений ряда физических величин, основными из которых являются ток, напряжение, а также (при испытаниях выключателей на коммутационную способность) скорость изменения тока, переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН). Все величины являются переходными или кратковременными, их регистрация в настоящее время производится путём осциллографирования.

Выпускаемые промышленностью средства измерений (СИ) могут быть использованы в лаборатории больших мощностей только в отдельных случаях. В основном же используются нестандартизованные СИ.

К настоящему времени разработаны и изготовлены:

- серия измерительных шунтов на токи 15, 55 и 170 кА (пик тока);

- серия широкополосных делителей напряжения на 150 и 600 кВ;

- индукционные преобразователи с интегрирующими усилителями для измерения токов до 250 кА в цепях напряжением до 35 кВ;

- индукционные преобразователи для измерения скорости подхода тока при синтетических испытаниях выключателей;

- прибор для измерения ПВН в испытательных цепях с эквивалентными частотами до 2 МГц.

Шунты и делители напряжения аттестованы и широко используются при испытаниях.

Помимо нестандартизованных средств измерений ГУП ВЭИ разработал и изготавливает специализированные средства испытаний, такие как искусственная линия для испытаний выключателей высокого напряжения в режиме неудалённых коротких замыканий, включающее устройство для синтетических испытаний аппаратов на включающую способность. На рис.3 приведен общий вид включающего устройства.

Существенное усовершенствование измерений может быть достигнуто только в результате их компьютеризации. В этом году в лаборатории больших мощностей запланированы разработка, изготовление и

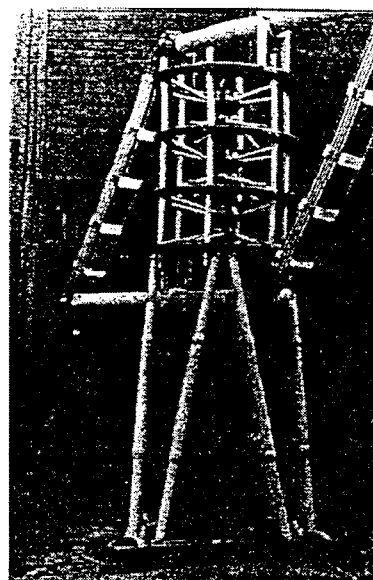


Рис.3. Лаборатория больших мощностей. Включающее устройство для синтетических испытаний выключателей высокого напряжения на включающую способность

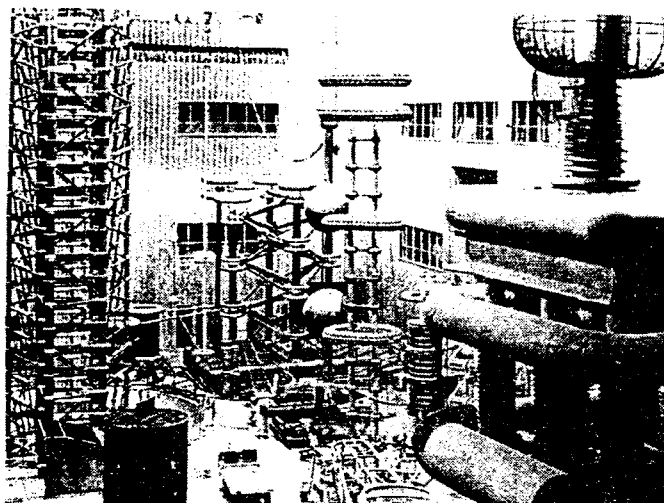


Рис.1. Лаборатория высоких напряжений. Общий вид Большого высоковольтного зала

Специальная камера с вводом на напряжение 1150 кВ позволяет проводить макетирование изоляционных промежутков в элегазе на самые высокие классы напряжения, а также испытывать отдельные элементы КРУЭ путем стыковки этих элементов с камерой.

Для испытания вводов с бумажно-маслянной изоляцией, а также исследования моделей изоляции трансформаторов, имеется технологическое оборудование, предназначенное для обработки трансформаторного масла.

Следует также отметить, что в лаборатории имеется уникальный комплекс оборудования, позволяющий проводить рабочие испытания разрядников и ОПН, когда воспроизводятся все эксплуатационные воздействия на защитный аппарат при возникновении перенапряжений.

Кроме электрических испытаний в лаборатории проводятся исследования механических характеристик изоляторов, а также исследования при одновременном воздействии электрических и механических нагрузок. Такие испытания обеспечиваются вертикальной разрывной машиной 500 кН, горизонтальной разрывной машиной 200 кН, а также специальными нагрузочными устройствами, которые позволяют проводить длительные испытания изоляторов при изменении по требуемому графику механических и электрических нагрузок.

В лаборатории постоянно проводятся работы по совершенствованию испытательных установок и методов испытаний. В настоящее время основное внимание уделяется внедрению компьютерных систем обработки экспериментальных данных.

Вторая лаборатория испытательного центра — это лаборатория больших мощностей, предназначенная для испытаний коммутационной аппаратуры. Специальное подразделение этой лаборатории может проводить климатические, механические испытания аппаратов и испытания их на нагрев в длительном режиме работы.

В лаборатории имеется всё необходимое оборудование для прямых и синтетических испытаний аппаратов на коммутационную способность, на стойкость к сквозным токам КЗ, на локализационную способ-

ность, на взрывобезопасность.

Лаборатория содержит два источника мощности для прямых испытаний, которые как каждый в отдельности, так и при совместной работе, являются источниками тока промышленной частоты при синтетических испытаниях. Имеется источник напряжения для синтетических испытаний, а также дополнительное испытательное оборудование (искусственная короткозамкнутая линия, установка для испытаний на включающую способность, установка для продления времени горения дуги и т.д.), обеспечивающие проведение коммутационных испытаний в соответствии с требованиями государственных стандартов и публикаций МЭК.

Испытательные поля оборудованы в шести железобетонных камерах.

Управление опытами производится с двух центральных (по количеству источников мощности) и двух вспомогательных пультовых помещений.

Компоновка испытательных полей, структура систем управления, а также организационные и технические мероприятия по технике безопасности позволяют проводить испытания одновременно от всех источников мощности.

Источники мощности включают в себя:

- стенд с генератором ТИ-100, мощность КЗ 2500 МВ·А, площадь помещений, занимаемая испытательным оборудованием 936 м² (рис.2);
- стенд с генератором ТИ-12, мощность КЗ 250 МВ·А, занимаемая площадь 500 м².

Часть оборудования — ударные испытательные трансформаторы — расположена на открытых площадках.

Источником напряжения является источник восстанавливающегося напряжения синтетической схемы 100 кА. Энергоёмкость накопителя энергии — 3,0 мДж, площадь 250 м².

Испытательные камеры оборудованы полами, позволяющими надёжно закреплять испытываемые аппараты, грузоподъёмными устройствами; разъединителями безопасности на вводах высокого напряжения. Размеры камер приведены в табл.2.

Подготовка аппаратов к испытаниям проводится в зале подготовки образцов, площадью 200 м², оборудованном грузоподъёмными устройствами. Испытатель-

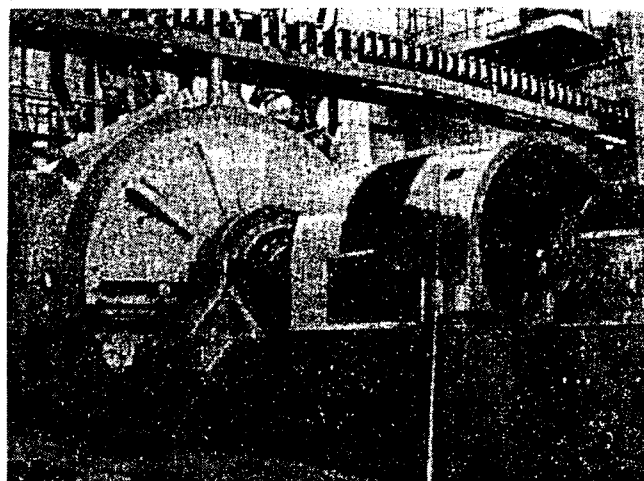


Рис.2. Лаборатория больших мощностей. Ударный генератор ТИ-100

Таблица 2

Размеры испытательных камер лаборатории больших мощностей

№	Размеры в плане, м ²	Высота, м
1	6×9	12
2	9×9	12
3	6×9	12
4	6×6	10
5	6×6	10
6	4×6	5

ный двор, примыкающий к камерам № 1—3 — является основным испытательным полем лаборатории, имеет площадь 400 м².

В лаборатории больших мощностей возможно проведение следующих видов испытаний:

1. Испытания на коммутационную способность:

— прямые испытания на отключающую и включающую способности выключателей на отключение токов до 40 кА (в трехфазном режиме) и 80 кА (в однофазном режиме) при напряжении 10 кВ и при напряжении 35 кВ токов 12,5 и 31,5 кА соответственно;

— синтетические испытания на отключающую способность выключателей на напряжение до 1200 кВ с напряжением на модуль (дугогасительный разрыв или группу разрывов) до 250 кВ и токи отключения до 100 кА;

— прямые трёхфазные и однофазные испытания выключателей на коммутацию конденсаторных батарей при напряжении 12 кВ на отключение токов до 500 А;

— синтетические испытания на отключение ненагруженных линий выключателей на напряжения до 1200 кВ с напряжением на модуль (дугогасительный разрыв или группу разрывов) до 100 кВ.

2. Испытания на стойкость к сквозным токам КЗ — ток электродинамической стойкости до 200 кА, ток термической стойкости до 80 кА.

3. Испытания на локализационную способность.

4. Испытания на взрывобезопасность.

Комплекс испытательного оборудования, предназначенный для климатических и механических испытаний включает в себя:

- климатическую камеру "НЕМА" — объём 8 м³, диапазон температур -60÷+300°С, относительная влажность до 98%, разряжение до 5 мм рт. ст.;

- климатическую камеру "ФОЙТРОН" — объём 0,6 м³, диапазон температур -75÷+100°С, относительная влажность до 98%;

- климатическую камеру КХТ-0,4 — объём 0,4 м³, диапазон температур -65÷+155°С;

- установку вибрационную электродинамическую ВЭДС-1500 — диапазон частот 20—1000 Гц, масса испытываемых изделий до 300 кг;

- стенд имитации транспортирования СИТ-2М — масса испытываемых изделий до 200 кг;

- стенд ударный 12 МУ 50/1470-1 — ускорения до 250 м/с², масса испытываемых изделий до 50 кг.

Указанное оборудование позволяет проводить климатические и механические испытания полностью собранных аппаратов, ячеек КРУ и КСО класса напряжения 10 кВ, отдельных изделий класса напряжения 35 кВ, высоковольтных вводов класса напряжения 110 кВ.

Проведение испытаний оборудования высокого напряжения сопряжено с выполнением измерений ряда физических величин, основными из которых являются ток, напряжение, а также (при испытаниях выключателей на коммутационную способность) скорость изменения тока, переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН). Все величины являются переходными или кратковременными, их регистрация в настоящее время производится путём осциллографирования.

Выпускаемые промышленностью средства измерений (СИ) могут быть использованы в лаборатории больших мощностей только в отдельных случаях. В основном же используются нестандартизованные СИ.

К настоящему времени разработаны и изготовлены:

- серия измерительных шунтов на токи 15, 55 и 170 кА (пик тока);

- серия широкополосных делителей напряжения на 150 и 600 кВ;

- индукционные преобразователи с интегрирующими усилителями для измерения токов до 250 кА в цепях напряжением до 35 кВ;

- индукционные преобразователи для измерения скорости подхода тока при синтетических испытаниях выключателей;

- прибор для измерения ПВН в испытательных цепях с эквивалентными частотами до 2 МГц.

Шунты и делители напряжения аттестованы и широко используются при испытаниях.

Помимо нестандартизованных средств измерений ГУП ВЭИ разработал и изготавливает специализированные средства испытаний, такие как искусственная линия для испытаний выключателей высокого напряжения в режиме неудалённых коротких замыканий, включающее устройство для синтетических испытаний аппаратов на включающую способность. На рис.3 приведен общий вид включающего устройства.

Существенное усовершенствование измерений может быть достигнуто только в результате их компьютеризации. В этом году в лаборатории больших мощностей запланированы разработка, изготовление и

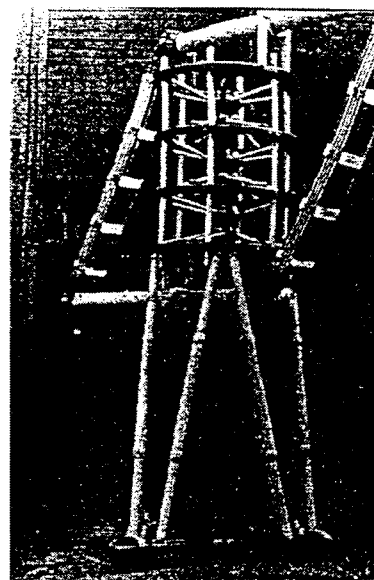


Рис.3. Лаборатория больших мощностей. Включающее устройство для синтетических испытаний выключателей высокого напряжения на включающую способность

опробование опытного канала измерений (с применением оптоволоконной техники) с выводом информации на компьютер.

Третья лаборатория ИЦ имеет возможность проводить испытания систем управления и защиты высоковольтного электрооборудования. Проводятся испытания на функционирование, электромагнитную совместимость в соответствии с требованиями МЭК, климатические испытания, испытания на вибропрочность и виброустойчивость. Для проведения испытаний на функционирование используется методика проверки устройств путём формирования специальных воздействий, формируемых компьютером по результатам математического моделирования объекта или путём задания специального синтетического проверочного воздействия. Используется также методика, позволяющая непосредственно подключать систему управления и защиты к математической модели объекта и провести её испытание при воздействиях, близких к реальным.

В ИЦ постоянно проводятся работы, направленные на совершенствование и развитие его экспериментальной базы. Это — создание новых испытательных стендов (камера солёного тумана, второй стенд для нагрева аппаратов номинальным током в длительном режиме работы), аттестация испытательного оборудования, методическое развитие испытаний. Наиболее актуальной проблемой последнего времени является создание автоматизированных систем измерений с выводом всех данных экспериментов на компьютер. Развитие таких систем позволит обеспечить ИЦ ГУП ВЭИ аккредитацию не только на национальном, но и на международном уровне.

В заключение следует отметить, что уникальная испытательная база ГУП ВЭИ позволила обеспечить разработку и испытания всего отечественного электрооборудования (вплоть до класса напряжения 1150 кВ), которое было создано в нашей стране в прошлые годы.

Оценка электрической прочности изоляционных конструкций с изолированными проводящими телами

КОРЯВИН А.Р., ВОЛКОВА О.В.

Представлены результаты исследований разрядных характеристик длинных воздушных промежутков с изолированным проводящим телом при воздействии коммутационных импульсов напряжения положительной полярности.

На основе предложенной модели процесса формирования лидерного разряда в каскадной форме выполнены расчетные оценки влияния размеров и пространственного расположения тела на значение разрядного напряжения систем.

Опорная изоляция в многообразных вариантах конструктивного исполнения является, пожалуй, наиболее распространенным элементом изоляционной системы подстанционного электрооборудования. Этим в значительной степени объясняется большое внимание, уделяемое изучению разрядных характеристик этого вида изоляции с последующей разработкой мер, направленных на увеличение ее электрической прочности. Как известно, наиболее эффективным способом повышения разрядных напряжений опорных изоляционных конструкций является применение экранов, способствующих созданию условий для преимущественного формирования разряда по чисто воздушному пути: экран-земля, предотвращая тем самым каскадные перекрытия изоляции и связанную с ними потенциальную возможность снижения разрядных напряжений. Следует отметить, однако, что даже при оптимально выбранных размерах экранной арматуры далеко не всегда удается полностью исключить появление каскадных перекрытий, сопровождающееся в ряде случаев резким (до 40%) снижением электрической прочности изоляционной конструкции [1]. В то же время сам факт наличия каскадных перекрытий не является неперенным условием снижения разрядных напряжений изоляции. Есть основание считать, что столь неоднозначное поведение разрядных харак-

теристик опорной изоляции при каскадных ее перекрытиях в значительной степени связано с различными соотношениями между высотой изоляционной колонки, размерами составляющих ее изоляторов и их фланцев.

Для проверки этого предположения были выполнены экспериментальные исследования в воздушной изоляционной системе стержень-плоскость длиной от 2,5 до 7,0 м с крестообразным проводящим изолированным телом (рис.1), представляющей собой простей-

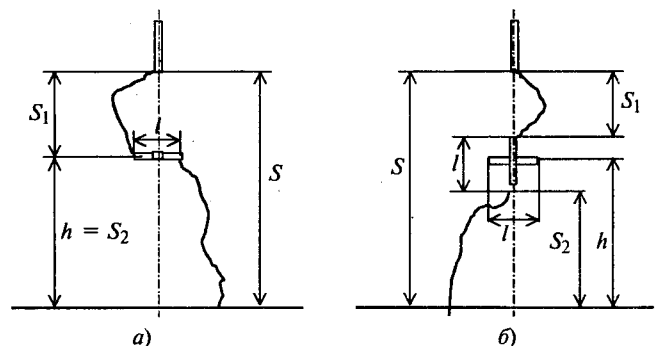


Рис.1. Эскизы исследуемых систем при горизонтальном (а) и вертикальном (б) расположении изолированного тела

Геометрические параметры испытываемых систем и их средние разрядные напряжения

S, см	l, см	U _{р.б.} , кВ	Пространственное расположение тела			
			Горизонтальное		Вертикальное	
			S ₁ , см	U _{р.к.} , кВ	S ₁ , см	U _{р.к.} , кВ
250	50	870	87	800	55	720
			122	850	90	740
			170	870	140	800
500	50	1400	175	1355	148	1270
			270	1375	245	1300
			340	1390	313	1380
	100	1400	185	1340	130	1175
			290	1350	223	1280
			335	1395	285	1340
700	140	1730	252	1725	172	1440
			370	1695	290	1550
			448	1715	365	1680

ший стилизованный вариант опорной изоляции. Геометрические параметры испытываемых систем приведены в табл.1.

Рассматривались два предельных варианта пространственного расположения тела: горизонтальное (рис.1,а) и вертикальное (рис.1,б). Крестообразная форма тела, имитирующего фланец изолятора, позволяла проследить за влиянием либо лишь радиальных размеров фланца (при горизонтальном расположении тела), либо как радиальных, так и осевых размеров фланца (при вертикальном расположении тела).

Испытания проводились при воздействии стандартного коммутационного импульса напряжения 250/2500 мкс положительной полярности с амплитудой, соответствующей вероятности пробоя базисной системы стержень-плоскость с межэлектродным расстоянием $S \approx 0,96$. По результатам испытаний определялись средние разрядные напряжения при каскадном перекрытии системы $U_{р.к.}$, которые сравнивались со средними разрядными напряжениями базисного промежутка стержень-плоскость $U_{р.б.}$

Приведенные в табл.1 и на рис.2 результаты исследований свидетельствуют, что наличие проводящего изолированного тела в изоляционном промежутке приводит к снижению разрядного напряжения системы $U_{р.к.}$. Спад $U_{р.к.}$ зависит от длины базисного промежутка S , размеров тела l его пространственной ориентации и высоты подвеса h .

Наименьшему влиянию подвержены разрядные характеристики систем с ориентацией крестовины в го-

ризонтовой плоскости. В этом случае, как видно из рис.2,а, для подавляющего большинства вариантов снижение относительного разрядного напряжения $U_{р.к.}/U_{р.б.}$ не превышает в среднем 3–4%, практически не зависит от размеров крестовины и уменьшается по мере роста длины верхнего промежутка S_1 .

Как и ожидалось, несравненно больший эффект достигается при второй ориентации тела, когда его вертикальная образующая длиной l шунтирует часть базисного промежутка. Из рис.2,б видно, например, что при постоянном отношении $l/S = 0,2$ сокращение S_1 сопровождается снижением $U_{р.к.}/U_{р.б.}$ до значений порядка 0,8.

Принимая во внимание реальные соотношения между строительной высотой изоляторов и геометрическими параметрами их фланцев, из анализа данных рис.2 следует, что для практических оценок влияния радиальных размеров фланцев изоляторов на разрядные напряжения конструкций можно пренебречь. Основным же фактором, способствующим снижению электрической прочности изоляции является сокращение изоляционной части изолятора, причем не любого, а находящегося в верхней части изоляционной колонки.

Полученный при исследованиях феноменологический материал позволил построить представленную на рис.3 стилизованную картину каскадного перекрытия изоляции и дать не только качественную, но и количественную оценку закономерностей поведения разрядных характеристик систем с проводящим изолированным телом.

Из рис.3 видно, что весь разрядный процесс можно разделить на два этапа. Первый этап характеризуется формированием лидерного разряда лишь в верхнем промежутке системы. Независимо от размеров тела, высоты его расположения и пространственной ориентации процесс начинается с возникновения на высоковольтном электроде стримерной короны и завершается в момент времени t_1 , когда стримеры нисходящего положительного лидера касаются изолированного тела. Второй этап начинается в момент времени t_1 и заканчивается к моменту t_2 (практически равному предразрядному времени t_p), когда образуется сквозная фаза в нижнем промежутке длиной S_2 и, соответственно, в системе в целом.

Для анализа разрядных характеристик изоляции

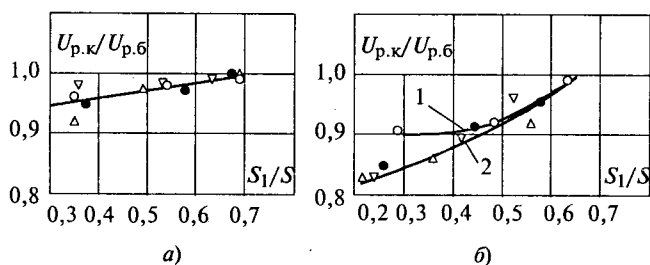


Рис.2. Относительные разрядные напряжения испытываемых систем в зависимости от относительной длины верхнего промежутка при горизонтальном (а) и вертикальном (б) расположении тела:

Δ — $S = 2,5$ м; \circ , \bullet — $S = 5,0$ м; ∇ — $S = 7,0$ м; Δ , \circ — $l = 0,5$ м; \bullet — $l = 1,0$ м; ∇ — $l = 1,4$ м; 1 — $l/S = 0,1$; 2 — $l/S = 0,2$

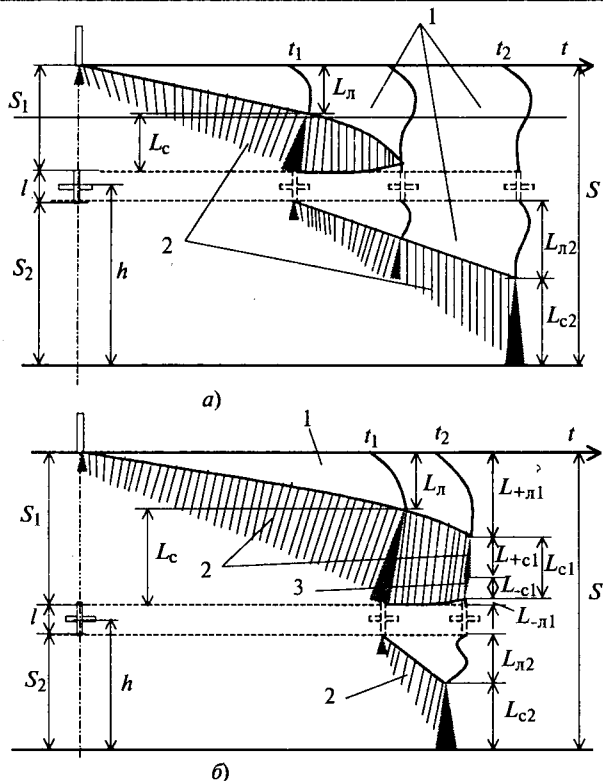


Рис.3. Стилизованная картина развития разряда в системах с изолированным телом при $S_1/S < 0,5$ (а) и $S_1/S > 0,5$ (б): 1 — лидер; 2 — положительные стримеры; 3 — отрицательные стримеры

наибольший интерес представляет конец второго этапа разрядного процесса, когда потенциал высоковольтного электрода практически совпадает с разрядным напряжением системы U_p . Учитывая, что длина отрицательного лидера $L_{-л1}$ пренебрежимо мала, для момента времени t_2 согласно рис.3 можно записать уравнение баланса напряжений в системе:

$$U_p = E_{л}L_{+л1} + E_{+с}L_{+с1} + E_{-с}L_{-с1} + E_{л}L_{л2} + E_{+с}L_{с2}, \quad (1)$$

где $E_{+с}$ и $E_{-с}$ — средняя напряженность поля в положительных и отрицательных стримерах, равная соответственно 4,5 и 10 кВ/см; $L_{+с1}$ и $L_{с2}$ — длина положительных стримеров соответственно в верхнем и нижнем промежутках системы; $L_{-с1}$ — длина отрицательных стримеров в верхнем промежутке; $L_{+л1}$ и $L_{л2}$ — длина лидерных каналов соответственно в верхнем и нижнем промежутках системы; $E_{л}$ — средняя напряженность электрического поля в канале лидера, кВ/см, определяемая в соответствии с [2,3] как

$$E_{л} = \frac{E_{+с}}{1 + 0,076L_{л}^{0,65}}. \quad (2)$$

Обработка феноменологического материала позволила получить следующие выражения для определения линейных параметров разрядного процесса, входящих в правую часть уравнения (1):

$$L_{с} = 1,3L_{сmin}, \quad (3)$$

где $L_{сmin}$ — минимальная длина положительной стримерной зоны к началу образования сквозной фазы в промежутке стержень-плоскость, определяемая с помощью метода критического коэффициента неоднородности электрического поля [2,3], см.

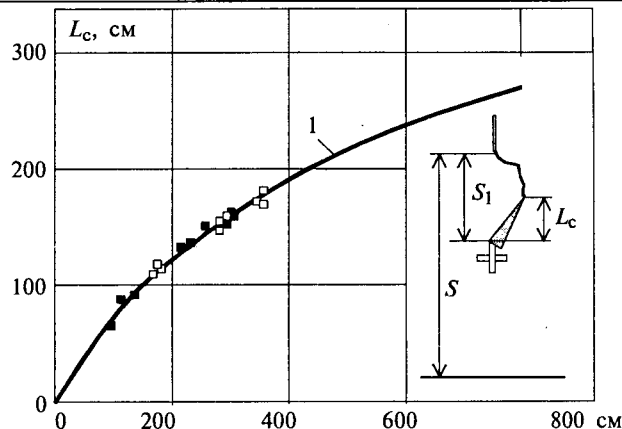


Рис.4. Зависимость длины стримерной зоны L_c в начале сквозной фазы в верхнем промежутке системы от его длины при горизонтальном (\square) и вертикальном (\blacksquare) расположении тела (1 — расчет по формуле (4))

Процесс определения L_c можно упростить, если вместо (3) использовать эмпирическую формулу [4]

$$L_c = 1,92S_1 - 0,71S_1^{1,12}, \quad (4)$$

расчеты по которой хорошо согласуются с оценками по (3) и приведенными на рис.4 экспериментальными данными.

Как видно из рис.5, между длиной положительных стримеров в конце первого этапа разрядного процесса L_c и протяженностью общей стримерной зоны в верхнем промежутке $L_{с1}$ в момент времени t_2 устанавливается линейная связь

$$L_{с1} = L_c \left(1,15 - 2,25 \frac{S_2}{S} \right). \quad (5)$$

В свою очередь длина отрицательной составляющей стримерной зоны в верхнем промежутке $L_{-с1}$ находится по формуле

$$L_{-с1} = 0,57L_{с1} \left(\frac{S_2 + l}{S} \right)^{0,74}. \quad (6)$$

Приведенные на рис.6 экспериментальные данные по длине положительной стримерной зоны в нижнем

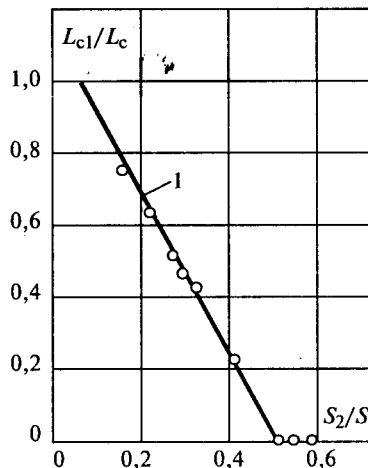


Рис.5. Расчетная зависимость по формуле (5) между отношением длин стримерных зон в верхнем промежутке к концу первого и второго этапа разрядного процесса от относительной длины нижнего промежутка системы

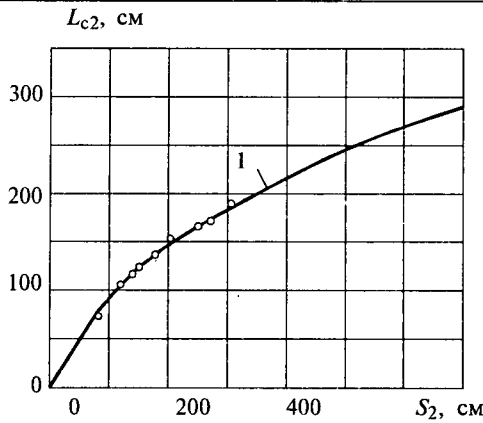


Рис.6. Расчетная зависимость по формулам (7), (8) протяженности стримерной зоны в начале сквозной фазы в нижнем промежутке от его длины

промежутке L_{c2} могут быть аппроксимированы кривой, состоящей из двух участков, определяемых выражениями

$$L_{c2} = S_2 \quad \text{при } S_2 \leq 80 \text{ см}; \quad (7)$$

$$L_{c2} = 4S_2^{0,82} - 0,82S_2 \quad \text{при } S_2 > 80 \text{ см}. \quad (8)$$

Т.е. при относительно небольшой длине нижнего промежутка стримерами пересекается все межэлектродное пространство и лишь при $S_2 > 80$ см появляется возможность для формирования лидерного канала.

С использованием системы уравнений (1)–(8), были выполнены расчетные оценки разрядных напряжений исследуемых систем с проводящим изолированным телом при вертикальном его расположении во всем возможном диапазоне изменения длины нижнего промежутка $0 \leq S_2 \leq S-l$. При этом в случаях относительно небольшой длины верхнего промежутка S_1 , когда лидер перекрывал его еще до момента времени t_2 (см. рис.3,а), для более правильного отражения процесса каскадного перекрытия в расчетные оценки падения напряжения в канале лидера длиной S_1 ($\Delta U_{л1} = E_{л}L_{+л1}$) вносилась корректировка. Очевидно, что в этих случаях найденные с помощью формулы (2) значения $\Delta U_{л1}$ (при подстановке в (2) $L_{+л1} = S_1$) будут несколько завышены. Действительно, хотя длина канала лидера после пересечения им верхнего промежутка остается неизменной, время его существования превышает необходимое для достижения длины S_1 . В результате средние градиенты напряжения в лидере должны быть ниже определенных по формуле (2) при подстановке в нее $L_{+л1} = S_1$. Для оценки снижения $E_{л}$ представим, что в диапазоне времени от t_1 до t_2 лидерные каналы в верхнем и нижнем промежутках развиваются с одинаковой скоростью (на самом деле скорость развития лидера в верхнем промежутке выше, чем в нижнем). В результате к моменту времени t_2 (в предположении отсутствия тела) нисходящий от высоковольтного электрода лидер, как минимум, смог бы достичь гипотетической длины

$$L_{+л1} = S_1 + L_{л2} - L_c. \quad (9)$$

Тогда для рассматриваемых случаев подстановкой (9) в (2) определяется скорректированное значение $E_{л}$.

Выполненные таким образом расчетные оценки разрядных напряжений систем с изолированным телом вместе с опытными данными представлены на

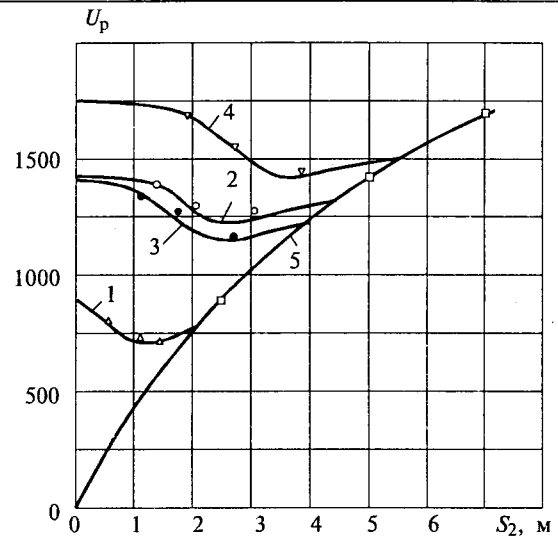


Рис.7. Зависимости разрядных напряжений систем с изолированным телом от длины нижнего промежутка:

1, Δ – $S = 2,5$ м; 2, \circ , 3, \bullet – $S = 5,0$ м; 4, ∇ – $S = 7,0$ м; 5, \square – $U_{p.б}$; Δ , \circ – $l = 0,5$ м; \bullet – $l = 1,0$ м; ∇ – $l = 1,4$ м; 1 – 5 – расчет

рис.7. Хорошее соответствие результатов расчетов экспериментальному материалу свидетельствует о правомерности использования предложенной модели каскадного перекрытия для практических целей. В частности, из анализа данных рис.7 видно, что зависимости $U_p = F(S_2)$ носят U-образный характер. В крайних точках кривые опираются на значения U_p , соответствующие промежуткам стержень-плоскость длиной S (при $S_2 = 0$) и $S-l$ (при $S_1 = 0$). Для всех рассмотренных случаев минимум U-образных кривых достигается при относительной длине нижнего промежутка S_2/S , близкой к 0,5. Именно при таких значениях S_2/S к моменту времени t_2 стримерная зона в верхнем промежутке сокращается до нуля, а суммарная длина лидерных каналов достигает наибольшего значения. При изменении S_2 в обе стороны от минимума кривых рис.7 суммарная длина лидерных каналов уменьшается, соответственно растут и разрядные напряжения систем, достигая наибольших значений в граничных точках (при $S_2 = 0$ и $S_2 = S-l$). Наибольший подъем U_p имеет место для левой ветви U-образных кривых. Отсюда следует тривиальный вывод о том, что для обеспечения наибольшей электрической прочности при каскадных перекрытиях изоляционные колонки должны выполняться на базе одного изолятора. При применении полимерных изоляторов и обеспечении глубокого уровня ограничения коммутационных перенапряжений такое конструктивное решение может быть вполне реальным для электрооборудования подстанций высокого и сверхвысокого напряжения, включая класс 500 кВ. Опорные изоляционные колонки для оборудования более высокого класса напряжения приходится составлять из двух и более изоляторов. При этом, как видно из рис.4, целесообразно ориентироваться на конструкции, состоящие из изоляторов существенно различной строительной высоты с минимально возможной высотой фланцев. Сокращение высоты фланцев будет способствовать вырождению U-образных кривых $U_p = F(S_2)$, что имеет важное практическое значение при выборе альтернативных вариантов исполнения колонок из разновысоких изоляторов. Действительно, из рис.7 видно, что

Таблица 2

Разрядные характеристики опорных изоляционных конструкций при коммутационном импульсе напряжения 4000/6500 мкс положительной полярности

Конструкция	В сухом состоянии			Под дождем		
	U_{50} , кВ	σ , %	$U_{p.k.}$, кВ	U_{50} , кВ	σ , %	$U_{p.k.}$, кВ
I	1840	7,1	1660	1500	8,0	1300
II	1740	8,6	1440	1380	6,5	1310
III	1800	11,7	—	1600	5,3	1500

в сухом состоянии изоляции даже при большой высоте фланцев l можно заметно поднять электрическую прочность колонки, используя в верхней ее части изоляторы большей строительной высоты (левая ветвь U-образных кривых).

При увлажнении поверхности опорных изоляторов дождем ситуация существенным образом меняется. Вследствие перераспределения электрического поля вдоль колонки под влиянием дождя создаются условия, при которых к концу второго этапа каскадного разрядного процесса лидерным каналом оказываются перекрыты практически все верхние элементы колонки, за исключением нижнего, шунтируемого стримерной зоной [1]. Таким образом, сокращение строительной высоты изоляторов вообще и в нижней части колонки в особенности способствует снижению электрической прочности опорной изоляции, находящейся под дождем. Сказанное подтверждается приведенными в табл.2 результатами исследований разрядных характеристик опорных изоляционных колонок из фарфоровых изоляторов, снабженных тороидальным экраном диаметром 2,0 м и установленных на подножке высотой 2,3 м.

Конструкция I состояла из трех одинаковых изоляторов строительной высотой 1,45 м каждый, а конструкции II и III — из двух изоляторов строительной

высотой 1,45 и 2,7 м. В конструкции II изолятор меньшей строительной высоты располагался в нижней, а в конструкции III — в верхней части колонки.

Из данных табл.2 видно, что воздействие дождя в целом негативно сказывается как на значение 50%-го разрядного напряжения изоляции U_{50} , так и на значении минимального фактически зарегистрированного разрядного напряжения при каскадных перекрытиях колонок $U_{p.k.}$. Наиболее сильному влиянию дождя подвержены разрядные характеристики конструкций I и II, в то время как для конструкции III с изолятором большей строительной высоты в нижней части колонки это влияние заметно меньше.

Выводы

1. На основе анализа процесса формирования лидерного разряда в каскадной форме выполнены расчетные оценки разрядных напряжений воздушных изоляционных систем с проводящим изолированным телом.

2. Показана целесообразность использования в опорных изоляционных конструкциях сверхвысокого напряжения разновысоких изоляторов с размещением изолятора большей строительной высоты в нижней части колонки.

Список литературы

1. Volkova O.V., Koriavin A.R., Golovnya V.G., Almazov A.V. Electrical strength of ultra-high voltage insulating constructions under rain conditions.//7-th Intern. Symp. on High Voltage Eng., Dresden, 1991. R 44-03. P.4.

2. Корявин А.Р. Минимальная электрическая прочность длинных воздушных промежутков с высоковольтным электродом различной формы//Электротехника. 1983. № 4. С. 23—26.

3. Корявин А.Р. Инженерные методы расчета электрической прочности изоляционных конструкций высокого напряжения//Электротехническая промышленность. Электрические аппараты и устройства высокого напряжения. 1989. Вып. 10. С. 45.

4. Корявин А.Р., Волкова О.В. Поражаемость изолированных проводящих объектов при разрядах в длинных воздушных промежутках//Электричество. 1998. № 5. С. 16—21.

Проблема электродинамической стойкости трансформаторов при коротких замыканиях¹

ЛЕВИЦКАЯ Е.И., ЛУРЬЕ А.И., ПАНИБРАТЕЦ А.Н.

Дана общая характеристика проблемы стойкости при КЗ трансформаторов, подробно рассмотрены наиболее важные аспекты проблемы в применении как к мощным, так и к распределительным трансформаторам. Показано, что в России (СССР) ряд лет тому назад уже было сильное обострение проблемы из-за аварий трансформаторов. В настоящее время появились признаки очередного обострения проблемы, и в статье даются предложения по тому, какими должны быть принимаемые меры. Даны материалы по состоянию проблемы за рубежом.

С 1967 г. до начала 90-х годов в России прошла волна очень серьезных аварий трансформаторов по

причине их недостаточной стойкости при КЗ. Ежегодно повреждались несколько мощных трансформаторов. Обнаружилось, что некоторые типы трансформаторов (например, автотрансформаторы связи, некоторые блочные трансформаторы, трансформаторы собственных нужд электростанций) спроектированы или изготовлены так, что они оказались аварийными.

¹ Авторы выражают благодарность своему коллеге, видному специалисту в области трансформаторов, кандидату технических наук Натану Натановичу Хубларову за ряд ценных и важных замечаний и предложений, высказанных в ходе подготовки статьи к публикации и ее рецензирования.

Сначала повреждались почти исключительно автотрансформаторы 220, 330, 500 кВ трехфазной мощностью до 501 МВ·А; АТДЦТН-200000/330/110, АТДЦТГ-240000/220/110, АТДЦТГ-240000/330/220, АОДЦТН-167000/500/220 и др. Но примерно с 1982 г. начались аварии при КЗ блочных трансформаторов 400 МВ·А на 220, 330, 500 кВ и 1000 МВ·А/330 кВ, затем наиболее крупных однофазных автотрансформаторов, в том числе 267 МВ·А/330 кВ и 333 МВ·А/750 кВ. Если в те годы для автотрансформаторов очередные аварии происходили только у наиболее старой модификации, снятой с производства, то аварии ходовых блочных трансформаторов 400 МВ·А были особенно угрожающими, так как они выявили нестойкую конструкцию недавних лет изготовления. Так, если автотрансформаторы 330 кВ 200—240 МВ·А были переработаны к 1977 г. и новые не повреждались, то авария трансформатора ТЦ-400000/500 в 1990 г. продемонстрировала, что эти ответственные трансформаторы имеют нестойкую конструкцию.

Волна аварийности при КЗ (наряду с волнами аварийности по причине больших добавочных потерь и по причине ползущего разряда) была для энергетики весьма неожиданна и болезненна. Кроме роста мощностей энергосистем и уровней токов КЗ волне аварий предшествовала многолетняя недооценка как изготовителями (заводами), так и потребителями трансформаторной продукции проблемы стойкости при КЗ. В СССР в 60—70-х годах еще не было массовых испытаний трансформаторов при КЗ, испытательных стендов было мало, они не были приспособлены для испытаний трансформаторов.

Аварийность трансформаторов в эксплуатации по какой-либо "систематической причине", в частности из-за недостаточной стойкости при КЗ, очень опасна тем, что ее ликвидация занимает многие годы и требует больших средств. Аварийная ситуация 60—70-х годов была существенно снижена примерно через 10 лет благодаря многим факторам. Особенно помогли исследования и испытания сотен трансформаторов и моделей в ВЭИ и НИЦ ВВА, которые предсказали нарастающую остроту проблемы стойкости при КЗ. Были созданы новые испытательные стенды (вслед за стендом ВЭИ) в НИЦ ВВА, УЭТМ, на Минском заводе. Начались всесторонние исследования проблемы стойкости при КЗ, закончившиеся конкретными мероприятиями по усилению конструкций трансформаторов: внедрением технологии стабилизации механических характеристик и размеров обмоток (прессовка при сушке, тренировка и др.), применением упороченных медных и алюминиевых сплавов, транспонированного провода со склеенными витками, новых изоляционных материалов, внедрением оптимизированных (в части сил КЗ) конструкций обмоток, и что очень важно, созданием новых компьютерных методов расчета обмоток при КЗ.

Так как в течение многих лет не было возможности испытывать мощные трансформаторы (выше 125 МВ·А), были разработаны устройства для испытания обмоток и их фрагментов в натуральную величину (МДУ-1, МДУ-3, РОСТ-М, РОСТ, ЛДУ, ДИНА). Наконец, в 1983 г. были организованы испытания на стойкость при КЗ трансформаторов предельных мощностей на самом мощном в Европе сетевом испытательном стенде МИС филиала ВЭИ в г. Тольятти. На этом стенде были испы-

таны однофазные трансформаторы мощностью до 333 МВ·А, трехфазные мощностью до 630 МВ·А, класса напряжения 220, 500 и 750 кВ и многие другие.

На основе массовых испытаний распределительных трансформаторов, специальных трансформаторов и мощных трансформаторов были разработаны и внедрены меры, обеспечившие на многие годы вперед выпуск трансформаторов, надежных с точки зрения стойкости при КЗ.

Большую роль в решении проблемы сыграла разработанная в 1977 г. стандартная методика расчета, которая была модернизирована в 1988 г. (РД16.431-88) и оснащена современными пакетами программ РЭСТ (ВЭИ), РСТ (ВЭИ и ВИТ, г. Запорожье). Методика и сейчас используется при проектировании и оптимизации практически всех новых конструкций высоковольтных трансформаторов, при модернизации существующих, а также при исследованиях и динамических испытаниях в РФ и странах СНГ, что позволяет существенно сократить сроки проектирования, обеспечить оптимальное вложение материалов, повысить надежность оборудования в экстремальных условиях.

Работы по исследованию стойкости при КЗ трансформаторов, проводившиеся последние 25—30 лет в ВЭИ, НИЦ ВВА, ВИТ, УЭТМ и ОАО "Электрозавод", привели к улучшению ситуации с надежностью трансформаторов в эксплуатации в части стойкости при КЗ.

Однако в последние годы снова наблюдается рост аварийности. Это явно не заметно, так как в последние годы ни у энергетиков, ни у трансформаторщиков, к сожалению, не работает система сбора и анализа данных об аварийности трансформаторов. Но при профилактических измерениях сопротивления КЗ Z_k , а также при диагностических обследованиях (например, с применением метода низковольтных импульсов и установки "Импульс" разработки ВЭИ) были выявлены выводимые в ремонт (ревизию) или даже эксплуатируемые трансформаторы, в которых имеются подозрения на механические деформации обмоток. В течение 1995—2000 гг. повредились такие трансформаторы, как АТДЦТН-200000/330/110, АТДЦТН-250000/500/110, ТД-80000/110, ТДНС-40000/220/11, ТРДЦН-125000/110, АОДЦТН-125000/110, АОРТЦ-135000/500/220.

В 2000 г. произошла авария при КЗ на шинах 220 кВ автотрансформатора АОДЦТН-167000/500/220-76У1, включенного в эксплуатацию в 1985 г. Важно подчеркнуть, что это трансформатор новой, относительно стойкой конструкции. Произошло сильное разрушение с дуговыми замыканиями последовательной обмотки ВН (из-за чрезмерных осевых сил), общая обмотка СН потеряла радиальную устойчивость, различные деформации получили обмотки НН, КО, РО.

Имеются сведения, что в последние годы были также аварии распределительных трансформаторов.

Далеко не все благополучно с новыми разработками распределительных трансформаторов. Это выявляется при немногочисленных испытаниях этих трансформаторов на стойкость при КЗ, примерно в каждом четвертом испытанном трансформаторе обнаруживались повреждения разной тяжести.

Таким образом, даже по неполным сведениям о современной ситуации с авариями трансформаторов проблема электродинамической стойкости трансформаторов при КЗ остается достаточно острой.

Вот уже десять лет, как практически прекращены

массовые испытания на стойкость при КЗ распределительных трансформаторов. Вместо ежегодных испытаний 30—40 типов испытывается не более 4—5 трансформаторов. Только один Минский электротехнический завод, сохранивший свое производство, проводит испытания всех новых разработок на стойкость при КЗ, другие заводы РФ и СНГ объемы испытаний резко снизили.

Полностью прекращены испытания мощных трансформаторов на МИС г. Тольятти (стенд закрыт), почти прекращены испытания полноразмерных моделей. Прекращены экспериментальные исследовательские работы, связанные с разработкой новых конструкций, технологий и материалов. Не финансируются работы по усовершенствованию методов расчета, по модернизации устаревших стандартов на нормы расчета и методы испытаний.

На основе внесенных ранее без согласования с ведущими организациями и специалистами "лазеек" в устаревшие стандарты развивается порочная система сертификации трансформаторов, при которой становится возможной закупка энергосистемами и промышленными предприятиями на заводах РФ, в ближнем и дальнем зарубежье трансформаторов без должной оценки их стойкости при КЗ в соответствии с требованиями стандартов РФ. Вопреки мнению специалистов в РФ сертификаты безопасности выдаются на трансформаторы, не прошедшие испытания на стойкость при КЗ.

В настоящее время нарушена ранее существовавшая специализация трансформаторных заводов, и теперь заводы России осваивают разработку многочисленных типов трансформаторов, которые ранее выпускались заводами в Запорожье и Хмельницком (Украина), Минске (Белоруссия), Чирчике (Узбекистан): блочных, трехобмоточных, тяговых, автотрансформаторов связи, распределительных и др. Возрастает объем экспорта и бесконтрольного импорта трансформаторного оборудования. Практически все эти конструкции приходят на подстанции, и даже на атомные станции, без испытаний на стойкость при КЗ. Чем чревата авария и пожар (или взрыв) трансформатора на АЭС понятно даже не специалисту.

Нельзя не отметить еще раз и практически полную ликвидацию в масштабах страны системы анализа отказов и аварий трансформаторов, которая раньше служила обратной связью эксплуатации с изготовителем. Некоторые аварии просто по разным причинам не попадают в статистику.

Нельзя сказать, что работы по динамической стойкости трансформаторов при КЗ в стране полностью прекращены. Эпизодически проводятся испытания трансформаторов в ВЭИ, НИЦ ВВА, УЭТМ. ОАО "Электрозавод" и УЭТМ пытаются осваивать новые технические решения, иногда проводят испытания моделей обмоток и заказывают независимую экспертизу своих новых проектов. Ведутся работы в ВЭИ по совершенствованию методов расчета, разрабатываются собственные методы расчета на Украине (ЗТЗ с помощью ВЭИ, ВИТ) и в Беларуси (МЭТЗ с помощью ВЭИ). Однако этого явно не достаточно.

Для специалистов очевидно, что все рассмотренные факторы, как показал опыт развития аварий 60—70-х годов, могут стать предвестниками новой волны аварийности трансформаторов.

В статье приведен список наиболее важной (за последние годы) литературы по рассматриваемой проблеме [1—23].

Стойкость при КЗ мощных трансформаторов. В настоящее время в России Московский электротехнический завод (ОАО "Электрозавод") стал единственным заводом по производству мощных трансформаторов классов напряжений 500 кВ и выше, мощные трансформаторы до 220 кВ кроме этого завода выпускает ТЭЗ, а в последнее время и УЭТМ.

Из-за прекращения работы сетевого стенда МИС (г. Тольятти) на ближайшие годы мощные трансформаторы не смогут быть испытаны на стойкость при КЗ. Это значит, что продукция заводов, производящих мощные трансформаторы для РФ, не может считаться полностью надежной (и конкурентоспособной), т.е. вскоре возникнет необходимость и восстановления стенда МИС, и проведения чрезвычайно дорогостоящих испытаний на стойкость при КЗ на зарубежных стендах. Известно, что испытания сухого трансформатора УЭТМ (мощностью 1000 кВ·А) и двух трансформаторов ЗТЗ (мощностью 63 и 62,5 МВ·А) уже проведены на стенде КЕМА (Голландия). Последние два трансформатора ЗТЗ поставлены в Турцию. В этой стране, так же как в Италии и Франции, испытания трансформаторов на стойкость при КЗ (или ссылка на успешно испытанный прототип) обязательны.

Недостаточно организована и работа по обеспечению стойкости при КЗ мощных трансформаторов по другим направлениям. Не проводится в достаточном объеме экспертное рецензирование принятых технических решений и обсуждение их специалистами (в том числе на НТС, МВК), не проводится квалифицированное расчетное сравнение с испытанными ранее трансформаторами производства других заводов (материалы испытаний имеются, например, в ВЭИ, специалисты могут провести такую работу).

Следует особо отметить, что на заводах РФ, в отличие от ЗТЗ, только еще будут осваиваться современные технологические процессы по обработке изоляционных материалов и обмоток (например, сушка под давлением), обеспечивающие стабильные их размеры и сохранение запрессовки в эксплуатации.

Поскольку не только массовых, но и единичных испытаний на стойкость при КЗ мощных трансформаторов в ближайшее время не предвидится, необходимо планировать испытания полноразмерных моделей на стендах ВЭИ, НИЦ ВВА, однако такая работа пока находится в зачаточном состоянии. Например, "Электрозавод" провел в ВЭИ испытания нескольких моделей обмоток из импортного склеенного транспонированного провода, но эта важная работа, к сожалению, проведена в очень небольшом объеме.

Еще в течение долгих лет мощные трансформаторы в России будут закупаться за рубежом, прежде всего на ЗТЗ. Многие мощные трансформаторы ЗТЗ прошли испытания на стойкость при КЗ в г. Тольятти, однако эти испытания проходили 10 и более лет тому назад. Вряд ли в ближайшие годы ЗТЗ будет испытывать в Голландии трансформаторы, предназначенные для продажи в РФ.

Следует отметить, что внедрен ряд технических решений, надежность и достаточность которых не успели проверить испытаниями мощных трансформаторов или полноразмерных моделей, например, склеенный и упрочненный провод, общая прессовка обмоток и др. Остаются мало исследованными радиальная и осевая устойчивость склеенных транспонированных проводов при рабочей температуре обмоток (при

размягчении склеивающего состава); меры по укреплению обмоток, на которые действуют тангенциальные силы КЗ; устойчивость на полегание крайних катушек; устойчивость обмоток к возникновению новых видов деформаций, выявленных при испытаниях мощных трансформаторов в г. Тольятти (осевые деформации из-за радиальных сил, деформации внешних обмоток под действием неравномерно распределенных по окружности радиальных растягивающих сил, стойкость сложных и относительно тонких обмоток РО).

Нуждается в пересмотре стандартизированная ранее методика расчета электродинамической стойкости трансформаторов (разработка ВЭИ [4]), поскольку уже накоплен опыт расчетов и испытаний, выявлены относительно новые виды деформаций обмоток, которые в полной мере не обеспечены пока расчетными методами. Явно устарели, как уже указывалось, требования стандартов, в первую очередь ГОСТ 11677 [1].

На ближайшие годы стоит на очереди решение ряда новых вопросов обеспечения надежности мощных трансформаторов: тепловое старение при эксплуатации; переход на современную конструкцию прессовки всех обмоток единой мощной плитой из толстого склеенного электрокартона; возможное изменение нормированного ударного коэффициента тока КЗ с 1,8 на 1,9 (увеличение нормированных расчетных сил на 11,4%) в соответствии с новыми требованиями МЭК и др.

Стойкость при КЗ распределительных трансформаторов. Особенностью развития трансформаторостроения последних лет является то, что нарушена специализация заводов, которая была в СССР. В условиях рыночной экономики в целях выживания на рынке заводы вынуждены принимать любые заказы на трансформаторы. Это обстоятельство привело к существенному расширению номенклатуры распределительных трансформаторов на заводах РФ и СНГ, ранее ими не выпускавшихся.

Так, "Электрозавод" освоил выпуск значительной части номенклатуры ЗТЗ, АО "Трансформатор" (г. Тольятти) осваивает производство бывшей номенклатуры "Укрэлектроаппарат" (г. Хмельницкий), БирЗСТ (г. Биробиджан) начал выпускать трансформаторы 1—2 габаритов из номенклатуры МЭТЗ (г. Минск), начал выпуск распределительных трансформаторов и УЭТМ (г. Екатеринбург). В связи с возросшими требованиями пожарной безопасности все заводы осваивают разные виды сухих трансформаторов. Такое расширение номенклатуры, часто по документации другого завода (с другой технологией), возможно без ущерба для надежности только при наличии испытаний на стойкость при КЗ по крайней мере очень близкого прототипа. Так как по требованию стандарта каждый завод должен испытывать свою продукцию, число типов трансформаторов, подлежащих испытаниям, накапливается. Однако число испытаний — единицы в год. Следовательно, большое количество типов распределительных трансформаторов остаются не испытанными, не подверглись проверке ни конструкция, ни технология и качество изготовления.

В последние годы укоренилась порочная практика использования всех возможных оговорок, существующих в последней редакции ГОСТ 11677, для отказа от испытаний на стойкость при КЗ с соответствующим снижением себестоимости и, на первый взгляд, выгодным для покупателя снижением продажной цены

трансформатора. Однако, очевидно, что для массовых серий трансформаторов экономия на стоимости испытаний ничтожна (стоимость испытаний не превышает нескольких десятков процентов от стоимости одного трансформатора), а возможный ущерб от низкой надежности массовой продукции у потребителей может быть неизмеримо больше. Именно поэтому в развитых странах, в отличие от существующей практики в России, испытываются на стойкость при КЗ практически все новые типы распределительных трансформаторов.

Для иллюстрации положения с испытаниями трансформаторов рассмотрим динамику испытаний на стенде ВЭИ. До 1990 г. на стенде ВЭИ ежегодно испытывалось до 15 трансформаторов. За период 1980—1984 гг. испытано 50 трансформаторов, в 1985—1989 гг. — 65, в 1990—1994 гг. — 40 (8 не выдержали), в 1995—2000 гг. — только 13 (3 не выдержали). Примерно такая же картина на испытательном стенде НИЦ ВВА, УЭТМ.

В настоящее время в условиях рыночной экономики объем испытаний резко упал из-за ошибочной политики сертификации (без участия специалистов по стойкости при КЗ), фактически полностью прекратились испытания поставляемых в Россию зарубежных распределительных трансформаторов.

Как показала практика нескольких десятилетий испытаний распределительных трансформаторов на стендах ВЭИ и НИЦ ВВА, эти испытания не только подтверждают их стойкость при КЗ, но и выявляют часто существенные недостатки в конструкции, в технологии и качестве изготовления трансформаторов. Это особенно важно в связи с резким ослаблением на заводах в последние годы контроля технологии и технической документации. Рекомендации по улучшению трансформаторов, которые дают специалисты стендов в процессе испытаний, способствуют обмену передовым опытом между заводами, нарушенному в последние годы. А его отсутствие сказывается, к сожалению, в том, что начали возникать грубые ошибки в конструировании и технологии изготовления трансформаторов. Например, на одном заводе для усиления стойкости при КЗ трансформатора мощностью 400 кВ·А применяли запечку лаком не только обмотки, но и всей выемной части. Для данного трансформатора такая "дикая" пропитка вряд ли существенно повысила его стойкость при КЗ. Но ведь вопросы отказа от пропитки решались еще 30 лет назад, за прошедшие десятилетия были найдены многие рекомендации, позволившие отказаться от пропитки лаком в распределительных трансформаторах при обеспечении надежной стойкости при КЗ. Другие примеры: специалисты неоднократно указывали на необходимость расчетной оптимизации конструкций по осевым силам, в том числе на недопустимость выполнения обмотки НН с осевым размером расчетного сечения меньше, чем в обмотке ВН, или на необходимость симметрирования обмоток и регулировочных витков по высоте обмоток, или на необходимость обеспечения надежной осевой опоры обмотки НН. Однако и эти простейшие требования часто нарушаются.

При таком положении отсутствие поголовных испытаний всех новых типов распределительных трансформаторов может привести к массовым авариям в эксплуатации.

В условиях ослабленного контроля за качеством изготовления распределительных трансформаторов опас-

ность представляет и полное отсутствие периодических испытаний на стойкость при КЗ. По мнению специалистов их необходимо проводить каждые 5—8 лет. В свое время при составлении стандарта ГОСТ 11677 эти испытания были включены для подтверждения как надежности конструкции, так и стабильности технологического процесса. Однако эти испытания (с помощью оговорок в стандарте) затем были фактически необоснованно отменены. Главной причиной отмены периодических испытаний в то время было вовсе не то, что они не необходимы, а перегрузка в то время испытательных стендов испытаниями новых трансформаторов. Сейчас уже давно такой причины нет. В результате эти испытания сейчас вообще не проводятся, получается так, что их можно отменить при формальной договоренности с потребителем (в настоящее время — с покупателем).

О замене испытаний сравнительным расчетом с испытанным прототипом. Особо заслуживает освещения вопрос о применении "правила прототипов", разрешающего в соответствии с ГОСТ 11677 и МЭК 76-5 [3] заменять испытания трансформатора сравнительным расчетом с успешно выдержавшим испытания трансформатором аналогичной конструкции. В свое время применение "правила прототипов" было введено как исключительная процедура из-за перегрузки испытательных стендов и только для того, чтобы избежать испытаний типоразмеров одного и того же трансформатора. Причем применение правила прототипов стало возможным только после разработки и внедрения практически на всех заводах СССР единой методики электродинамических расчетов (ВЭИ), доведенной до формы отраслевого стандарта и снабженной комплектом компьютерных программ.

В настоящее время "правило прототипов" зачастую понимается изготовителями трансформаторов и "сертификаторами" как официальный путь замены испытаний трансформаторов расчетами, что недопустимо. Для сопоставительных расчетов необоснованно и без согласования со специалистами по стойкости при КЗ применяются в качестве "прототипа" трансформаторы, прошедшие испытания 10—15 лет тому назад, трансформаторы, изготовленные по другой технологии, или вообще другой конструкции, или даже на другом заводе.

К тому же перечень требований, которым должны удовлетворять сравниваемые трансформаторы (критерии подобия и правило выбора прототипа), изложенный в п.9 ГОСТ 11677, является неполным, а правильность сравнительных расчетов может быть установлена только специалистами по стойкости трансформаторов при КЗ. В свое время в ВЭИ была разработана методика сравнительного расчета для применения "правила прототипов", сейчас разработан усовершенствованный ее вариант, который необходимо будет внедрить в практику.

Правильному и обоснованному применению "правила прототипов" препятствует отсутствие массовых испытаний, так как исчезают сами "прототипы" (особенно для мощных трансформаторов).

Из-за снижения технического уровня проектирования и расчетов стойкости при КЗ на заводах стали появляться конструкции с более высоким уровнем расчетных электродинамических нагрузок, чем в ранее испытанных аналогах, которые в результате этого не могут быть приняты в качестве прототипа. Другой пример: из-за роста несимметрии нагрузок в трехфаз-

ных распределительных сетях заводы стали изготавливать типоразмеров распределительных трансформаторов с группой соединения D/Y-11. Расчеты показали, что силы в этих трансформаторах могут существенно отличаться, от сил в испытанных трансформаторах этого типа с группой соединения Y/Y-0, т.е. испытанные трансформаторы не могут быть приняты в качестве прототипа для новых трансформаторов, т.е. необходимы испытания.

С другой стороны, заводы часто проектируют по давно испытанным "аналогам", часто в угоду надежности вкладывают лишние материалы, снижающие конкурентоспособность отечественных трансформаторов, при этом никак не проверяется уровень и стабильность технологии.

О сертификации трансформаторов без обязательных испытаний на стойкость при КЗ. Единственной официальной оценкой технического уровня, надежности и безопасности трансформаторного оборудования в настоящее время является их сертификация. Однако, используя несовершенство ГОСТ 11677, изготовители часто при сертификации представляют протоколы испытаний на стойкость при КЗ или ссылки на протоколы испытаний прототипа давности, существенно превышающей сроки периодических испытаний — 5—8 лет. Например, при сертификации на рынке России трансформатора типа ТДТНЖ-25000/110 производитель (ЗТЗ) представил в 1996 г. протокол испытаний на стойкость при КЗ трансформатора типа ТДТН-25000/110, явно не являющегося прототипом для ТДТНЖ, да еще и 1980 г.! Несмотря на отрицательное заключение специалистов, трансформатор был сертифицирован, хотя известны случаи аварий этих трансформаторов. Подобные примеры можно приводить еще. Для облегчения процедуры сертификации испытания на стойкость при КЗ не включены в список обязательных сертификационных испытаний на безопасность, предусмотренные процедурой сертификации периодические испытания (для подтверждения уровня производства), как правило, не проводятся. Выдачей сертификатов могут заниматься разные организации без привлечения в качестве экспертов специалистов по стойкости при КЗ.

В условиях рыночной экономики вопрос купли-продажи трансформатора и его сертификации (по безопасности и по параметрам) некоторые пытаются свести к децентрализованным взаимоотношениям производителя (отечественного или зарубежного) и покупателя (энергосистемы, подстанции предприятия), а также организации, выдающей сертификат. Такое положение следует считать недопустимым. Ведь производитель прежде всего хочет подороже продать трансформатор, а покупатель хочет подешевле купить трансформатор, свой интерес есть и у "сертификатора". В сложившейся ситуации принципиально неверно пренебрежение интересами потребителей электроэнергии, не входящих в эту "тройку", для которых важна надежность работы трансформаторов (надежность энергоснабжения), а не формальное удовлетворение требований устаревшего стандарта в угоду интересам продавца и покупателя. Эти отношения должны регулировать стандарт.

Предложения по изменению стандарта ГОСТ 11677. Прежде всего из п.6.5 этого стандарта необходимо исключить допущение о возможности непроведения как приемочных, так и периодических испытаний транс-

форматоров на стойкость при КЗ. Необходимо четко указать, что непроведение испытаний — это исключительный случай, связанный с отсутствием технической возможности таких испытаний, а также четко связать процедуру отказа от испытаний с обязательным сравнением по установленным правилам с успешно испытанным прототипом.

Если нет технической возможности испытать трансформатор и нет прототипа, можно ввести возможность проведения независимой экспертизы с указанием организаций (или межведомственных комиссий), имеющих право на проведение такой экспертизы в силу своей профессиональной подготовки.

Необходимо определить в стандарте термин "основной потребитель", который решает ряд важных вопросов: испытывать ли трансформатор или делать сравнение трансформатора с прототипом по определенной методике. Если раньше роль "основного потребителя" играло Минэнерго СССР, то теперь эти обязанности необходимо возложить на РАО "ЕС России" или другую компетентную организацию. Во всяком случае вопросы стойкости трансформаторов при КЗ должны решать специалисты и организации, ответственные за надежное снабжение страны электроэнергией, а не только производители трансформаторов, покупатели трансформаторов и "сертификаторы", заинтересованные прежде всего в цене на трансформатор.

Необходимо изменить п.6.5 стандарта ГОСТ 11677 и заново ввести периодические испытания на стойкость при КЗ. Возможность отмены или переноса этих испытаний должна быть оговорена лишь при отсутствии технической возможности (например, для трансформаторов мощностью более 125 МВ·А). При этом как минимум должна быть проведена экспертиза неизменности уровня технологии.

Необходимо уточнить и расширить раздел стандарта, касающийся сравнения с испытанным прототипом (п.6.9 стандарта).

Эти предложения уже были представлены Постоянной Российской части (ПРЧ) ТК14 МЭК и не вызвали возражений специалистов.

Ситуация за рубежом (МЭК, СИГРЭ). В противоположность положению в РФ и СНГ, за рубежом проблеме стойкости при КЗ трансформаторов уделяется большое внимание.

Последние несколько лет работа Комитета 14 МЭК и Комитета 12 СИГРЭ "Трансформаторы" проходит под знаком стойкости при КЗ (последний раз СИГРЭ так подробно рассматривал эти вопросы более 20 лет назад). Завершен пересмотр Публикации 76-5 МЭК "Стойкость при КЗ", практически закончена работа СИГРЭ по созданию методики расчетной оценки стойкости при КЗ (для включения в Стандарт МЭК).

Несколько слов о новой Публикации 76-5 МЭК. В новой редакции, хотя и сняты ограничения на испытания самых мощных трансформаторов (более 100 МВ·А), фактически усилена роль расчетно-конструкторской оценки стойкости при КЗ (ранее допускалась только ссылка на испытанный трансформатор-прототип, теперь допускается использовать испытания моделей). Причем выбор способа фактически отдан на откуп потребителю. Более того, соответствующий пункт в русском переводе звучит так, что по согласованию между покупателем и изготовителем стойкость при КЗ может вообще не демонстрироваться. Такая позиция устраивает не всех, в результате ряд стран проголосовал

против новой редакции Публикации, в том числе Франция, Италия и Россия, мотивируя это неравноценностью этих способов и необходимостью приоритета испытаний до тех пор, пока не будет выработана единая достоверная методика расчетной демонстрации стойкости. Однако такое кажущееся умаление роли испытаний фактически не является у "них", в отличие от России, "откатом" от испытаний, поскольку в передовых странах производитель отвечает за качество своей продукции, а потребитель трансформаторов отвечает за качество электроснабжения и выбирает надежного поставщика, имеющего положительный опыт испытаний своей продукции. Т.е. и тот, и другой заинтересованы в испытаниях, что, кстати, подтверждается на деле: за рубежом стенды загружены испытаниями трансформаторов на стойкость при КЗ, о чем будет сказано далее. Другие изменения в Публикации 76-5 направлены как раз на ужесточение требований к стойкости при КЗ. Это и увеличение расчетного ударного коэффициента тока КЗ для мощных трансформаторов с 1,8 до 1,9, фактический запрет испытаний "без бака", при которых по некоторым данным возможно изменение и снижение в некоторых случаях осевых сил, и др.

Фактически весь ход работы Комитета 12 на сессии СИГРЭ-2000 г. в Париже проходил под девизом: "То test or not to test", как выразился один из участников дискуссии, перефразируя классика.

Тон дискуссии задан вопросами в специальном докладе: чем объяснить большую процент поврежденных при испытаниях (около половины), являются ли испытания единственным способом подтверждения стойкости при КЗ, должны ли трансформаторы проектироваться на повышенные испытательные требования, как долго еще нужно испытывать трансформаторы, ведь их конструкции улучшаются с каждым годом, не нужно ли снизить расчетные токи КЗ, должны ли быть пересмотрены критерии оценки результатов испытаний, как много производителей готовы заплатить за дорогостоящие испытания на стойкость при КЗ, можно ли заменить испытания расчетом, должны ли мы рассматривать поле в окне или вне окна при расчете осевых сил, наступит ли время, когда только производственные дефекты станут причиной повреждений, возможно ли измерение сил при испытаниях для получения большего эффекта от дорогостоящих испытаний, правильно ли ориентироваться при испытаниях на наихудшее сочетание условий КЗ, не принимая во внимание вероятность их появления?

В докладах прослеживается схожесть развития ситуации со стойкостью при КЗ мощных высоковольтных трансформаторов в разных странах с развитием ситуации в СССР (России). Вначале (примерно до 60-х годов) практически не предъявлялось особых требований к стойкости при КЗ, трансформаторы проектировали и изготавливали по образцу и подобию трансформаторов более низких классов напряжений, уделяя особое внимание вопросам изоляции и потерь. Например, в Италии вначале такие трансформаторы стали производить 8 фирм, сегодня осталось только 2, причем те, трансформаторы которых имели наименьший уровень аварийности. Возникла лавина повреждений, связанных с недостаточной стойкостью при КЗ. Первой реакцией было — ограничить значения токов КЗ. В частности, для ограничения тока КЗ

наиболее частых однофазных КЗ стали применять установку сопротивления в заземленных нейтралях. В ряде случаев пришлось пойти на повышение напряжения КЗ трансформаторов (в 2 раза и более), применять трансформаторы там, где более выгодны автотрансформаторы. Однако эти меры оказались экономически менее выгодными, чем создание трансформаторов с достаточной динамической стойкостью. Ведь, например, увеличение напряжения КЗ приводит к необходимости применения более широкого диапазона РПН, к нежелательному росту реактивной мощности. Полное или частичное разземление нейтрали может подвергнуть оборудование большим перенапряжениям, это может привести к необходимости повышения уровня изоляции нейтрали и т.д. Под давлением проблемы обеспечения стойкости трансформаторов при КЗ стали проектировать трансформаторы под конкретные требования систем (т.е. разумно снижать нормируемые токи КЗ), отказываться от третичных обмоток НН (имеющих низкую стойкость при КЗ), развивать методы расчетной оптимизации и экспертизы, использовать новые материалы, применять строгий процесс производственного и технологического контроля: при намотке, стабилизации, сборке, сушке, пропитке, установке и прессовке обмоток. Во всех странах стали проводить много теоретических и экспериментальных исследований. И самое главное — приступили к систематическим массовым испытаниям трансформаторов на стойкость при КЗ. Этот путь прошла Франция, начиная с 70-х годов, Италия — с 80-х, Турция — с 90-х. Например, в Италии до конца 80-х годов повреждаемость автотрансформаторов из-за КЗ была достаточно высокой, она составляла более 2% (более половины всех аварий), причем основные повреждения были связаны с потерей радиальной устойчивости общей обмотки. А в настоящее время повреждений практически нет.

Установленный факт: производители, испытывающие свою продукцию, имеют значительно более высокий авторитет у покупателя, причем такая продукция не всегда дороже. Имея "прошлые" испытанные прототипы, продавец предъявляет их сертификат и может не повышать цену. Тот же, кто не испытывал раньше, вынужден на всякий случай вкладывать больше материалов на незнание, снижать плотность тока, т.е. фактически завышать цену.

По результатам опроса СИГРЭ повреждаемость трансформаторов 110 кВ и выше по причине стойкости при КЗ в среднем очень низка — 15 повреждений за последние 5 лет на 120000 трансформаторо-лет! Правда, не были получены данные от самых неблагополучных в этом отношении стран (по оценкам — это Юго-восточная Азия, Индия, Китай). Эти результаты находятся в вопиющем противоречии с результатами испытаний на стойкость при КЗ: около половины мощных трансформаторов не выдерживают испытаний. В дискуссии по этому поводу противники испытаний говорили: "Вот видите, насколько испытания не адекватны эксплуатации!", а сторонники: "Вот видите, к какому повышению надежности приводят испытания!" Кстати, ни один из 15 поврежденных трансформаторов не проходил испытаний и лишь 5 имели экспертизу конструкции, но без сравнений с прототипом.

Во Франции, которая проводит испытания с 1965 г., на сегодняшний день фактически нет ни одного мощного (до 600 МВ·А, 400 кВ) не испытанного (или не

имеющего успешно испытанного прототипа) трансформатора. Расчетные методы и методы сопоставления с прототипом развиваются на базе испытаний. Повреждаемость в эксплуатации близка к нулю.

В одной из крупнейших в мире испытательной лаборатории КЕМА (Голландия) за 1996—1999 гг. испытано 8, 6, 12 и 15 единиц в год соответственно (мощностью более 25 МВ·А), в том числе 14 единиц мощностью до 50 МВ·А (2 испытаны успешно), 14-50-100 МВ·А (6 успешно), 7 — 100—200 МВ·А (2 успешно) и 6 — более 200 МВ·А (3 успешно). По классу напряжений: до 150 кВ (15) почти все неуспешно, 150—250 кВ — успешно 7 из 17, 350—550 кВ — успешно 5 из 9. Испытывались одно- и трехфазные трансформаторы, автотрансформаторы, блочные, вспомогательные, трехобмоточные и др., частота 50—60 Гц, схемы соединения Y и D. Наибольшие из испытанных — 250 МВ·А однофазный и 440 МВ·А трехфазный. При испытаниях нередки случаи, когда трансформаторы их не выдерживали или выдерживали с серьезными замечаниями. Например, из 20 трансформаторов, результаты испытаний которых известны, 10 повредились в первых испытаниях. Основные примеры повреждений при испытаниях: выпадение прокладок и ослабление прессовки, потеря радиальной устойчивости, закручивание обмоток тангенциальными силами, деформации и повреждение отводов, разрушение изоляторов.

В Канаде на сетевом стенде IREQ (Квебек) в 1999 г. испытаны 2 блочных трансформатора: 775 МВ·А (крупнейший в мире из испытанных), 230±5% кВ для АЭС и 102 МВ·А с расщепленной обмоткой НН для ГЭС. По результатам неудачных испытаний (в первом зафиксированы тангенциальные деформации, во втором сильные деформации от осевых сил) трансформаторы были усилены, после чего успешно выдержали повторные испытания.

В Италии испытываются практически все распределительные трансформаторы. Повреждаемость в эксплуатации очень низкая. Введен новый мощный стенд, на котором уже испытан очень мощный трансформатор. Ежегодно испытывают десятки трансформаторов.

Постоянно проводят испытания на стойкость при КЗ в Китае, Южной Корее, Индии, Чехии, Мексике, Аргентине, Колумбии и других странах. Имеются сведения о введении в строй новых стендов для испытаний трансформаторов в этих и других странах.

В Великобритании проводится большая работа по исследованиям электродинамической стойкости, в частности радиальной устойчивости обмоток, на моделях.

Все испытательные лаборатории делают выводы о том, что результаты испытаний почти всегда показывают необходимость улучшения конструкции и производства, производители практически всегда удовлетворены опытом испытаний, а трансформаторы, успешно выдержавшие испытания на стойкость при КЗ, практически не имеют аварийности по этой причине.

Таким образом, за рубежом, в отличие от РФ, проводится большая работа по обеспечению надежности трансформаторов при КЗ.

Выводы

1. Парк трансформаторов в РФ стареет. Заводы России осваивают новые, не свойственные им ранее типы трансформаторов, в том числе самые мощные и ответственные, с применением новых технических решений без проведения их испытаний на стойкость при

КЗ, часто без квалифицированной экспертизы специалистов. На заводах снижается квалификация работников трансформаторов по вопросам стойкости при КЗ по ряду причин (резкое снижение объема испытаний, отсутствие техучебы и т.д.). Возрастает фактически бесконтрольный (без экспертизы специалистов по стойкости при КЗ) импорт трансформаторного оборудования. Государственные стандарты устаревают. В МЭК утвержден новый вариант стандарта на стойкость при КЗ, поставивший равенство между испытаниями и расчетным подтверждением стойкости при КЗ, есть вероятность его прямого применения в РФ, что недопустимо. Катастрофически возрастает число типов трансформаторов, не имеющих успешно испытанных прототипов. Назрела необходимость совершенствования методов расчета и экспертизы.

2. В настоящее время из-за резкого снижения объема испытаний существующие в РФ испытательные стенды приходят в упадок. Пока еще теплится работа на стендах ВЭИ, НИЦ ВВА, УЭТМ, "Электрозавод", но полностью пришел в нерабочее состояние стенд МИС г. Тольятти, один из самых мощных в мире. Если после принятия ряда экстренных мер и удастся восстановить требуемый объем испытаний трансформаторов мощностью до 125 МВА, то на долгие годы в РФ более мощные трансформаторы испытывать будет негде. А нужда испытывать их рано или поздно придет. Поэтому уже сейчас необходимо принципиально решать, где и когда нужно организовывать испытания мощных трансформаторов (восстанавливать стенд в Тольятти или организовывать новый, например, в Белом Расте). Чем раньше поставить и решить этот вопрос, тем менее болезненно будет ощущаться отсутствие испытательной базы для мощных трансформаторов.

3. Положение в России по проблеме стойкости трансформаторов при КЗ контрастирует с положением в развитых зарубежных странах, в которых проводится большое число испытаний, вводятся в работу новые испытательные стенды. А ведь в СССР проблеме стойкости при КЗ уделялось такое же внимание, как и в передовой в этом отношении Франции.

Отсутствие решения в ближайшие годы этих проблем будет способствовать снижению технического уровня, безопасности и конкурентоспособности отечественных трансформаторов. Необходимо довести до понимания руководителей РАО "ЕЭС России", энергосистем, подстанций, руководителей производства, испытательных стендов, специалистов по трансформаторам в сферах производства и эксплуатации тревожное состояние всех основных аспектов проблемы электродинамической стойкости трансформаторов при КЗ. Если такое понимание возникает, то при помощи специалистов по стойкости при КЗ возникнут и действия, которые позволят смягчить и предотвратить возможное развитие аварийной ситуации в энергетике РФ.

Список литературы

1. International standard IEC60076-5. Power transformers. Part 5. Ability to withstand short circuit. Second edition 2000-07.
2. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия (Power Transformers / General specifications). М.: Изд-во стандартов. 1990.
3. ГОСТ 20243-74. Трансформаторы силовые. Методы испытаний на стойкость при коротком замыкании (Power transformers. Method of short circuit tests). М.: Изд-во стандартов. 1986.

4. Лурье А.И., Зенова В.П., Мильман Л.И. и др. Отраслевая методика расчета: Трансформаторы силовые. Расчет электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании (РТМ16800.428-77, РД16-431-88).

5. Fyvie J.D., Christensen P.W. Special report for group 12 (Transformers). 2000 session papers. Special Reports, Paris, 2000.

6. Зенова В.П., Мильман Л.И. Использование моделей для оценки радиальной устойчивости сжимаемых обмоток трансформаторов // Электротехника. 1976. №4. С.17—21.

7. Конов Ю.С., Хубларов Н.Н. Полноразмерные модели для исследования электродинамической стойкости крупных трансформаторов // Электрические станции. 1980. №3. С.44—49.

8. Конов Ю.С., Могузов В.Ф., Хубларов Н.Н. Основные вопросы контроля и обеспечения стойкости мощных трансформаторов при коротких замыканиях // Электрические станции. 1981. №3. С.37—40.

9. Апакин А.В., Ашавин В.Т., Белов П.В. и др. Результаты испытаний трансформатора ТДТН-25000/110 на стойкость при коротком замыкании // Электротехника. 1987. №4. С.5—10.

10. Кохан П.Г., Лазарев В.И., Дубинин Ю.А. и др. Изучение радиальной устойчивости обмоток трансформаторов из транспонированного провода со склеенными элементарными проводниками на физических моделях // Техническая электродинамика. 1988. №6. С.74—77.

11. Зенова В.П., Лурье А.И., Мильман Л.И., Панибратец А.Н. Тангенциальные силы в обмотках трансформаторов при коротком замыкании // Всесоюз. научно-техн. конф. "Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовой точной и полупроводниковой техники". М.: ВЭИ, 1990.

12. Лазарев В.И., Науменко Л.В. Радиальная устойчивость цилиндрических обмоток трансформаторов // Техническая электродинамика. 1990. №6. С.83—88.

13. Лазарев В.И., Дубинин Ю.И., Семусева В.П., Сорока М.В. Осевые колебания обмоток трансформаторов под общим прессующим кольцом // Техническая электродинамика. 1993. №1. С.48—52.

14. Долгополов А.Г., Шлегель О.А., Червяков В.А. и др. Мощный сетевой стенд в г. Тольятти для испытаний и исследований электрооборудования на напряжение до 1150 кВ // Доклад на конференции ТРАВЕК-95. М., 1995.

15. Зенова В.П., Левицкая Е.И., Лурье А.И. и др. Система программ РЭСТ для расчета электродинамической стойкости, потерь и нагревов трансформаторов и реакторов // Электротехника. 1996. №8. С.37—44.

16. Дулькин И.Н., Зенова В.П., Лурье А.И. и др. Новые возможности и области применения системы программ по тепловому и электродинамическому расчету трансформаторов (РЭСТ-Т) // Научн. тр. ВЭИ. Тепловые процессы в электротехническом оборудовании. 1996. С.7—13.

17. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И., Андреев Д.В., Бельцер В.Р. Диагностика деформаций обмоток силовых трансформаторов и реакторов методом низковольтных импульсов // Электротехника. 1997. №3. С.48—51.

18. Зенова В.П., Лурье А.И., Панибратец А.Н. Совершенствование методов и норм расчета трансформаторов на стойкость при коротких замыканиях // Доклад на конференции "Электротехника-2010 год. Наука, производство, рынок". М., ВЭИ-ТРАВЕК. Т.1. 1997. С.201.

19. Дробышевский А.А., Зенова В.П., Левицкая Е.И. др. Вопросы современной международной и российской стандартизации в области электродинамической стойкости трансформаторов при коротких замыканиях // Доклад на конференции "Электротехника-2010 год. Наука, производство, рынок". М., ВЭИ-ТРАВЕК. Т.2. С.40.

20. Лурье А.И. Об определении максимального тока при включении цепи RL на переменное напряжение // Электричество. 1997. №12. С.23—29.

21. Bertagnolli G. Short-circuit duty of power transformers // ABB Transformatori. Legnano (Milano), Italy. 1998. P. 200.

22. Панибратец А.Н. Исследования и расчеты электродинамической стойкости при коротких замыканиях мощных силовых трансформаторов. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: ВЭИ, 1999. С.220.

23. Лурье А.И. Ударный ток трансформаторов и реакторов при коротком замыкании с учетом добавочных потерь // Электричество. 2001. №2.

Высокочастотные озонаторы нового поколения

ДАНИЛИН В.В., КОКУРКИН М.П., ПАШИН М.М., СМОРОДИН А.И., ПУРЕСЕВ Н.И.

Как известно, озонирование является практически единственным универсальным способом обработки воды, поскольку уничтожает полностью все микробы, значительно уменьшает содержание растворенной в воде органики, очищает воду от загрязнения фенолами и некоторыми химическими соединениями, не поддающимися другим химическим реагентам. Поэтому применение озона связано, прежде всего, с очисткой питьевой воды, которое имеет уже более чем вековую историю.

В последнее время наблюдается увеличение числа различных технологических процессов, в которых применяется озон. К ним можно отнести процесс отбеливания целлюлозы, очистку специфических сточных вод, например, радиоактивных, переработку отслуживших свой срок резинотехнических изделий и некоторые другие процессы. Как правило, в таких технологических процессах требуется применение больших количеств озона высокой концентрации. В ближайшем будущем следует ожидать, что количество технологических процессов с использованием озона высокой концентрации будет возрастать. Поэтому будет расширяться производство озонаторов, позволяющих получать озон требуемого качества, и совершенствоваться их конструкция.

Учитывая, что озон является достаточно дорогим химическим реагентом, совершенствование конструкции озонаторных установок будет связано, наряду с прочим, и со снижением себестоимости и повышением КПД генераторов озона. Для получения больших количеств озона с высокой концентрацией наиболее эффективно применение генераторов озона, использующих барьерный разряд и работающих на кислороде. При этом для достижения максимального выхода озона с единицы поверхности электродов необходимо:

— обеспечить интенсивный отвод тепла от разрядного промежутка, исключающий разложение озона из-за перегрева;

— поместить диэлектрический барьер, имеющий высокую электрическую прочность и теплопроводность, с обеих сторон разрядного промежутка;

— снизить длину разрядного расстояния при условии сохранения постоянства этого расстояния во всей зоне разряда.

В ГИЦ ВЭИ им. В.И.Ленина на основе комплекса исследований по изучению электрического синтеза озона и опыта работы в области электрофизики и техники высоких напряжений разработан озонатор с высокими технико-экономическими характеристиками. Электроды (рис.1) генератора озона пластинчатой формы выполнены из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм и изготавливаются штамповкой, что позволяет обеспечивать достаточно высокую точность геометрических размеров при длине разрядного промежутка порядка 500 мкм.

В качестве диэлектрического барьера применена стекломаль специального состава. Стекломаль наносится на поверхность пластинчатого электрода методом электростатического напыления с последующим

обжигом при температуре около 1100 К. Толщина сформированного стекломалевого покрытия составляет 0,5 мм. Электрические характеристики стекломалевого барьера достаточно высоки: электрическая прочность — не менее 20 кВ/мм, диэлектрическая проницаемость — не менее 8, тангенс угла диэлектрических потерь — не более 0,005.

Уменьшение разрядного расстояния до 0,5 мм при достаточной равномерности зазора между электродами позволило повысить концентрацию озона и снизить удельные энергозатраты из-за более равномерного распределения плотности мощности разряда в промежутке и улучшения теплоотвода из зоны разряда. Высокая равномерность разрядного промежутка исключает местные перегревы, ведущие к снижению концентрации озона и повышенному износу диэлектрического барьера.

Кроме этого, снижение длины разрядного расстояния дает возможность уменьшить рабочее напряжение что повышает надежность работы оборудования в целом. Высокая точность установки электродов позволяет увеличить удельную мощность разряда не за счет роста амплитуды питающего напряжения, а за счет повышения частоты (до 8 кГц), что также способствует увеличению надежности работы изоляции.

Конструкция генератора озона защищена патентами Российской Федерации, и на 45-й Всемирной выставке изобретений, исследований и новых промышленных разработок "BRUSSELS EUREKA" отмечена серебряной медалью.

Схема генератора озона представлена на рис.2. В цилиндрическом корпусе размещены 11 электродов, 6 из которых (нечетные) заземлены, а на остальные 5 (четные) подается высокое напряжение. Каждый электрод охлаждается водой. Расстояние между электродами (разрядное расстояние) устанавливается с помощью дистанционных прокладок (на рис.2 не показаны). Кислород подается в генератор озона через входной штуцер, затем проходит разрядный промежуток в направлении от периферии к центру и поступает к потребителю через выходной штуцер.

Высокая эффективность озонаторной установки в целом обеспечивается в том случае, когда источник питания создается для совместной работы с конкретным генератором озона. От степени согласования работы источника питания с генератором озона во мно-

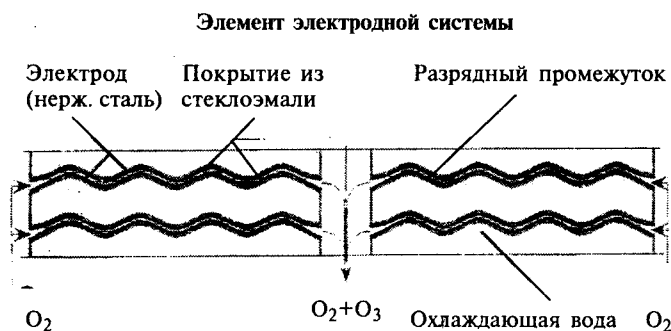


Рис.1.

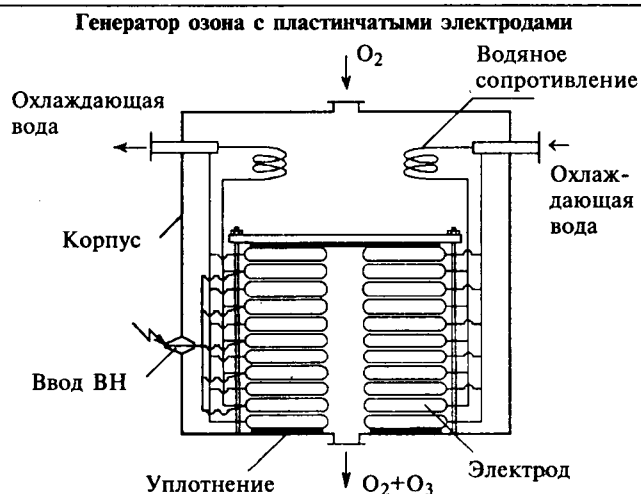


Рис.2.

гом зависит такой важный показатель для промышленного озонатора большой производительности как удельные затраты энергии на получение озона.

Следует отметить, что электрический разряд в газе, являющийся основой для образования озона, представляет собой сложную нагрузку для источника питания, которая с ее емкостным характером требует принятия специальных мер, обеспечивающих надежную и устойчивую работу высоковольтного источника питания. Следовательно, создание надежно работающего источника питания является не меньшей проблемой, чем создание генератора озона.

Известно, что наиболее благоприятной формой напряжения для электролиза озона в барьерных озонаторах является синусоида [1], а ее получение на частотах в единицы и десятки килогерц наиболее оптимально при использовании схемных решений на основе резонансных инверторов. Проведенный анализ патентной и научно-технической литературы подтверждает, что в основу источников питания генераторов озона, как правило, закладываются именно резонансные инверторы. Разработанный источник питания генератора озона выполнен по традиционной структурной схеме, по которой обычно и строятся высоковольтные системы электропитания подобного типа: управляемый выпрямитель, фильтр постоянного тока, инвертор, высоковольтный трансформатор. Управляемый выпрямитель обеспечивает решение двух задач: стабилизация напряжения на входе инвертора, а следовательно, и генератора озона при колебаниях напряжения в питающей сети, и плавный выход на рабочее напряжение генератора озона, исключающий ударный наброс мощности на его электроды.

Поскольку уровень рабочей частоты составляет 8 кГц, а активная мощность модуля источника питания от 25 до 100 кВт, то предпочтительными коммутаторами являются мощные быстродействующие тиристоры, обладающие большими коммутационной и перегрузочной способностями. Однако непростой характер нагрузки не позволяет использовать классические схемы тиристорных инверторов, так как инвертор должен устойчиво и надежно работать на заданной частоте при изменении нагрузки вплоть до КЗ. Режим КЗ возникает каждый полупериод рабочей частоты ин-

вертора, так как озонатор до зажигания разряда в газоразрядном промежутке представляет собой емкость, активное сопротивление которой близко к нулю. Кроме того, инвертор должен обладать системой быстродействующих защит от срывов инвертирования и сверхтоков с ускоренной подготовкой к автоматическому повторному включению.

Положенный в основу источника питания генератора озона трехфазный резонансный инвертор за счет применения оригинальных схемотехнических решений обеспечивает выполнение всей совокупности выдвинутых требований, что подтвердила опытно-промышленная эксплуатация.

Высоковольтный высокочастотный трансформатор выполнен на сердечнике из аморфного железа и обладает высоким значением КПД.

Параметры источника питания генератора озона мощностью 100 кВт

Амплитуда выходного напряжения, кВ	8
Рабочая частота, кГц	8
КПД, не менее, %	90
Габариты	
(высота, ширина, глубина), мм	2000×600×800
Масса, кг	300

ООО "Криогенмаш" разработал технологию изготовления пластинчатых электродов с использованием процессов высокоточной штамповки тонколистовых материалов, сварки и их специальной термообработки. Реализация этих технологических процессов, использование эластичных свойств гофрированных пластин электродов и применение специальных приспособлений для размерного позиционирования электродов позволяют получать эквидистантный разрядный промежуток равный 0,5 мм при серийном изготовлении в условиях промышленного производства.

Проведены испытания макета генератора озона. В период испытаний использовался кислород с концентрацией 90—95% и влагосодержанием, соответствующим точке росы 205—210 К. Температура кислорода на входе в генератор озона составляла 295 К. Для охлаждения электродов использовалась проточная вода в количестве 3 м³/ч с температурой на входе 285—290 К.

На электроды генератора озона от источника питания подавалось переменное напряжение частотой 8 кГц и амплитудой до 7 кВ.

Энергозатраты P (Дж/кг) определялись по формуле:

$$P = \left(\frac{Q_w \Delta T c}{Q_{O_3}} + 2,95 \cdot 10^6 \right) \frac{1}{\eta},$$

где Q_w — расход воды, кг/ч; ΔT — разность температур воды на входе и выходе, К; Q_{O_3} — количество произведенного озона, кг; c — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); $2,95 \cdot 10^6$ — энергозатраты на синтез озона, Дж/кг O_3 ; η — КПД источника питания, равный 0,9.

Результаты испытаний приведены в табл.1

Уменьшение разрядного расстояния с 0,5 до 0,4 мм привело к значительному снижению энергозатрат на производство озона и увеличению выхода озона при высоких концентрациях озона (200 г O_3 /м³).

При концентрации озона 80 г O_3 /м³ наблюдалось снижение выхода озона при практически одинаковых энергозатратах.

Таблица 1

Разрядное расстояние, мм	Концентрация озона, г/м ³	Производительность, кг/ч	Энергозатраты, МДж/кг	Удельная производительность, г/(ч·дм ²)
0,5	80	2,5	25,6	27,0
0,5	150	1,7	39,2	18,5
0,5	200	1,0	60,5	10,9
0,4	80	1,9	24,5	20,6
0,4	150	1,6	28,1	17,4
0,4	200	1,4	30,6	15,0

На базе представленной пластинчатой системы электродов разработаны конструкции озонаторов, производительность отдельных блоков которых составляет 2,5 и 5 кг озона в час.

Для получения небольших количеств озона (до 200 г О₃/ч) экономически выгоднее применение озонаторов с использованием трубчатых электродов. Нами разработаны и выпускаются озонаторы с трубчатой системой электродов производительностью от 20 до 100 г О₃/ч. В электродных системах с диэлектрическим барьером из стекломали применено двухстороннее водяное охлаждение и двухстороннее эмалирование электродов из нержавеющей стали. Характеристики озонаторов приведены в табл.2.

На базе созданных озонаторов разработаны и эксплуатируются установки для очистки питьевой воды,

Таблица 2

Показатель	ОБС-2,2	ОБС-5,5
Рабочий газ	Кислород	Кислород
Производительность по озону (регулируется), г/ч	30	100
Концентрация озона на выходе, г/м ³ (н.у.)	<200	<150
Расход газа, м ³ (н.у.)/ч	≤0,35	≤1,25
Избыточное давление потребляемого газа, МПа	≤0,1	≤0,1
Избыточное давление в генераторе озона, МПа	≤0,1	≤0,07
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	0,1	0,4
Температура охлаждающей воды, К	≤293	≤293
Электропитание	220В, 50Гц	220В, 50Гц
Потребляемая мощность, кВт	0,3	1,0
Габаритные размеры (длина×высота×ширина), см	40×60×15	50×260×30
Масса, кг	9	30

переработки резинотехнических изделий, очистки сточных вод, загрязненных радиоактивными элементами, ряда других производств, в том числе и использующих не чистый кислород, а подготовленный атмосферный воздух.

Распределенные системы противоаварийного управления с параллельной обработкой информации

КОВАЛЕВ В.Д., КОВАЛЕВ С.В.

Разработана структура и алгоритмы работы распределенной системы противоаварийного управления с использованием многоуровневого распараллеливания вычислений управляющих воздействий. Исследованы синхронный и асинхронный режимы передачи информации между нижними и верхними уровнями распределенной системы управления. Определены требования к скорости передачи информации. Получены обобщенные зависимости для определения требуемого числа параллельных вычислителей.

Функционирование Единой электроэнергетической системы (ЕЭС) страны невозможно без средств автоматизации управления нормальными и аварийными режимами ее работы. Системы автоматического управления обеспечивают надежность, устойчивость и живучесть функционирования ЕЭС, оптимизацию режимов ее работы и качество вырабатываемой электроэнергии, работоспособность и защиту электротехнического и энергетического оборудования.

Развитие и усложнение энергосистем требует разработки новых методов управления ЕЭС, направленных на преодоление проблемы многомерности, существенное сокращение времени и повышение точности формирования управляющих воздействий (УВ).

Одной из основных задач автоматического управления электроэнергетическими системами (ЕЭС) является обеспечение устойчивости ЭЭС при аварийных

повреждениях электротехнического и энергетического оборудования.

Противоаварийное управление для обеспечения устойчивости энергосистем осуществляется комплексом устройств автоматического регулирования и противоаварийной автоматики.

Применение промышленных микропроцессоров и микроЭВМ дало возможность создания иерархических систем противоаварийного управления, отличающихся большей надежностью, точностью вычисления УВ и меньшей стоимостью по сравнению с централизованными устройствами противоаварийной автоматики (УПА).

Иерархические системы противоаварийного управления. Анализ особенности архитектуры иерархических систем, устойчивости ЭЭС, а также опыта создания и эксплуатации в энергосистемах цифровых устройств

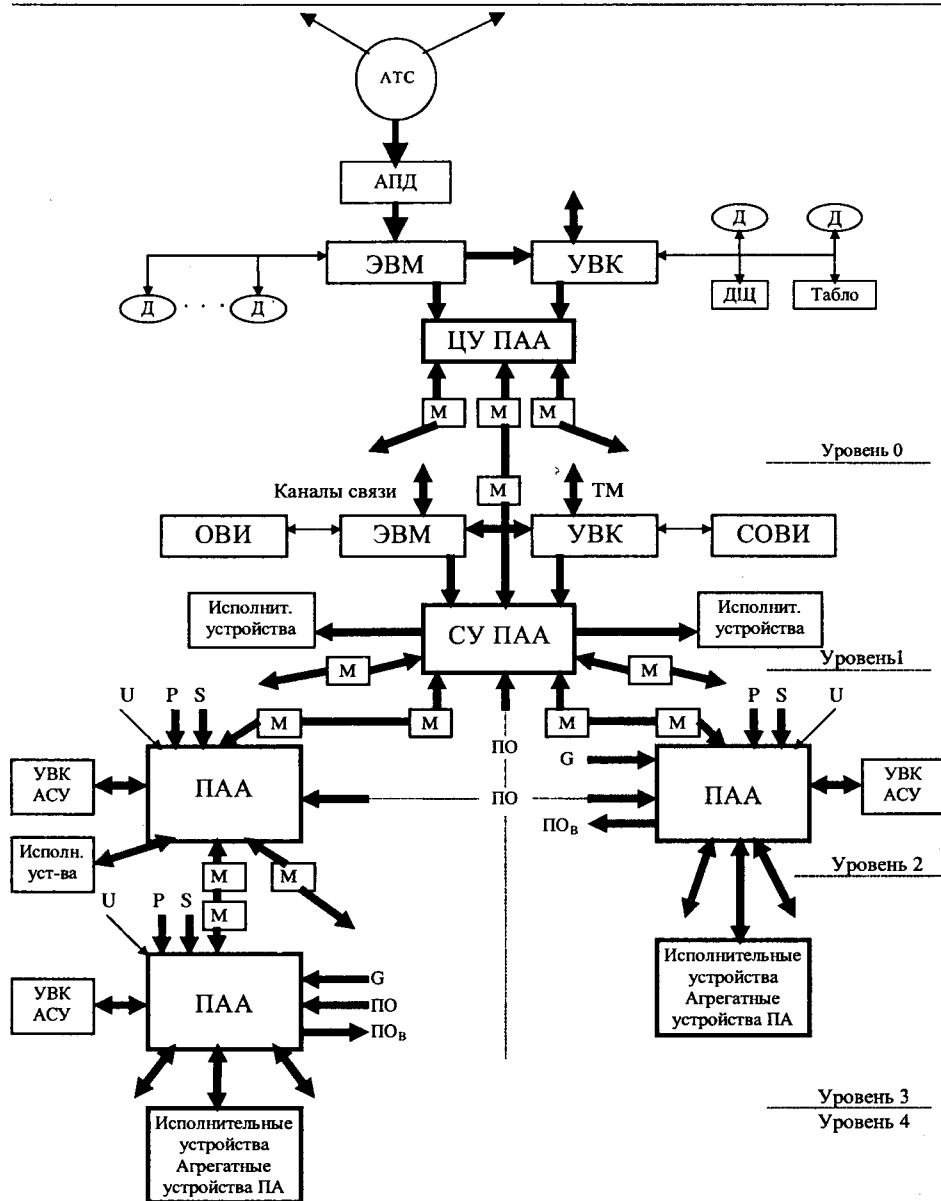


Рис.1. Структурная схема иерархической многоуровневой системы противоаварийного управления

управления дает основание для выбора в общем случае пятиуровневой иерархической системы противоаварийного управления [1] (рис.1).

Нижний уровень включает в себя агрегатные и исполнительные устройства противоаварийной автоматики (устройства автоматического управления мощностью и возбуждением генераторов, устройства управления статическими компенсаторами реактивной мощности, регуляторы мощности передач и вставок постоянного тока, исполнительные устройства для отключения генераторов, нагрузок и деления электрической схемы энергосистемы).

В качестве станционного уровня противоаварийного управления может использоваться устройство противоаварийной автоматики типа ПАА [2]. Устройства ПАА при получении сигналов от пусковых органов (ПО), фиксирующих аварийные возмущения в схеме выдачи мощности электростанции, формируют и выдают на исполнительные устройства управляющие воздействия (УВ), достаточные для сохранения устойчи-

вости электростанции. УВ определяются в такте расчетов нормального режима в соответствии с топологической схемой сети S по таблицам решений или полиномиальным функциональным зависимостям от контролируемых режимных параметров P . Управляющие воздействия, определенные устройствами ПАА или полученные от вышестоящих устройств противоаварийной автоматики, распределяются между агрегатами электростанции с учетом логической информации G , характеризующей отключение генераторов в результате аварийных возмущений. ПАА формируют также пусковые сигналы (ПС), пропорциональные значениям определяемых мощностей разгрузок электростанций. Информация о готовности и очередности отключения агрегатов поступает от общестанционной автоматизированной системы управления (АСУ). Из ПАА в АСУ передается регистрирующая информация на устройства отображения и хранения.

Узловые устройства противоаварийной автоматики (уровень 2) вычисляют управляющие воздействия, необходимые для сохранения устойчивости группы электростанций относительно остальной части энергообъединения. Алгоритмы их работы аналогичны алгоритмам станционных устройств ПАА.

Системные устройства противоаварийной автоматики (СУ ПАА) должны контролировать распределенные энергообъединения за исключением тех рай-

онов, где устойчивость обеспечивается устройствами ПАА. Основной задачей СУ ПАА является сохранение статической устойчивости параллельной работы электростанций внутри энергообъединения.

Контролируемые режимные параметры, а также логические сигналы о состоянии элементов электрической схемы поступают по каналам телемеханики (ТМ) в управляющий вычислительный комплекс (УВК). В УВК осуществляется обработка исходной информации и по каналам межмашинного обмена передача в СУ ПАА. Дежурный персонал получает информацию и общается с УВК через систему отображения и ввода информации (СОВИ), включающую в себя дисплеи D , дистанционный щит ДЩ и табло (рис.1).

Центральное устройство противоаварийной автоматики (ЦУ ПАА) должно контролировать основные межсистемные связи и обеспечивать статическую устойчивость единой энергетической системы (ЕЭС) или некоторой ее части.

Первый иерархический (двухуровневый) комплекс противоаварийного управления создан для объединенной энергосистемы Средней Волги [3], где для верхнего уровня противоаварийного управления применена миниЭВМ СМ-1420, а на нижнем уровне используются микропроцессорные устройства противоаварийной автоматики типа ПАА.

Для формирования управляющих воздействий противоаварийной автоматики необходимо выполнить достаточно большой объем расчетов с использованием полных моделей энергосистем. Если эти расчеты выполнять в цикле заданного интервала времени T непосредственно устройствами противоаварийного управления, необходимо также иметь полную информацию о значениях генерирующих мощностей и нагрузок энергосистемы к началу каждого цикла расчета.

Анализ быстродействия микропроцессорных средств и быстродействующих рабочих станций с учетом перспектив их развития и распараллеливания вычислительных процессов показывает, что реализовать расчеты управляющих воздействий, необходимых для сохранения динамической устойчивости, за заданный интервал времени T ($T=5-40$ с) не представляется возможным. Поэтому для устройств стационарного и узлового уровней (рис.1) формирование управляющих воздействий по-прежнему необходимо осуществлять предварительно, а непосредственно в устройства закладывать алгоритмы в виде полиномиальных зависимостей управляющих воздействий от режимных параметров или таблиц решений [4].

Для системных и центральных устройств противоаварийной автоматики, призванных осуществлять расчеты управляющих воздействий преимущественно для обеспечения статической устойчивости, предлагается иной подход. Если системные устройства имеют в каждом из энергообъединений, связанных между собой относительно небольшим количеством межсистемных связей, для формирования управляющих воздействий целесообразно использовать методы функционального (кибернетического) моделирования (КМ), базирующиеся на принципах параллельной и распределенной организации расчетов [5].

Методы функционального (кибернетического) моделирования и быстродействующие системы с распараллеливанием вычислительных процессов позволяют повысить точность вычисления и существенно уменьшить цикл расчетов управляющих воздействий. Так, управляющие воздействия, формируемые в миниЭВМ иерархической системы противоаварийного управления ОЭС Поволжья с применением традиционных методов расчета установившихся режимов даже с применением усеченных моделей энергосистем, вычисляются для всех расчетных возмущений за 2—3 мин. За это время режим энергосистемы может существенно измениться.

В соответствии с принципами КМ модель системы имеет иерархическую структуру с N уровнями подсистем и $N+1$ уровнем анализа (обычно $N=1$). На верхнем уровне модели представляются функциональными характеристиками (ФХ), отражающими зависимости между их граничными переменными при соблюдении всех ограничений на внутренние переменные, задаваемых математической моделью подсистемы.

Функционирование модели в соответствии с этим методом включает следующие этапы [5]:

1) последовательное определение ФХ подсистем все более высокого уровня — ход вверх;

2) построение модели верхнего уровня, представляющей собой систему уравнений, включающую граничные переменные подсистем, и решение данной системы уравнений;

3) последовательный расчет внутренних переменных подсистем все более низкого уровня — ход вниз.

Такая структура является обобщением известной классической структуры модели в виде системы уравнений, относящейся к системе в целом, и имеющей таким образом один уровень анализа. Иерархический алгоритм КМ может быть соответственно построен на основе любого исходного алгоритма, имеющего один уровень анализа и называемого базовым алгоритмом.

Методы КМ отличаются также от традиционных методов моделирования объединенных энергосистем тем, что позволяют отказаться от эквивалентирования смежных энергообъединений. Однако для формирования УВ в СУ ПАА с использованием моделей энергосистем необходимо организовать передачу на верхний уровень функциональных характеристик подсистем (ход вверх), а обратно граничных переменных после решения на верхнем уровне уравнений связи. Поскольку такие обмены выполняются в каждом цикле расчетов, необходимы достаточно надежные и быстродействующие каналы связи.

Анализ развития каналов связи на ближайшую перспективу показывает, что энергетики и связисты делают ставку на волоконно-оптические линии связи, по которым может быть надежно обеспечена передача информации со скоростью до 500 Мбит/с.

Рассмотрим структуру организации формирования управляющих воздействий и взаимодействие СУ ПАА и ЦУ ПАА с использованием указанных выше методов и алгоритмов.

На уровне СУ ПАА, устанавливаемых в каждом энергообъединении, должен осуществляться расчет параметров для "своего" энергообъединения. Если УВ реализуются только в этом энергообъединении, СУ ПАА оптимизирует также УВ.

На уровне ЦУ ПАА, устанавливаемом в Центральном диспетчерском управлении Единой энергосистемы России (ЦДУ ЕЭС), должно осуществляться решение систем уравнений связи и оптимизация УВ, если УВ должны реализовываться в различных энергообъединениях.

Заметим, что при применении методов КМ для расчета потоков мощности и оценки устойчивости (по сходимости расчетов) участвуют одновременно СУ ПАА всех энергообъединений и ЦУ ПАА для каждого из моделируемых возмущений (в том числе и на межсистемных связях). Поэтому подход, связанный с применением методов КМ, изменяет функции ЦУ ПАА для случаев использования традиционных методов моделирования с эквивалентированием и не требует использования специальных методов координации СУ ПАА и ЦУ ПАА.

Управляющие воздействия, сформированные в СУ ПАА передаются в устройства узлового или стационарного уровней ПАА для реализации в случае поступления пусковых сигналов или остаются на СУ ПАА, если к СУ ПАА заведены соответствующие пусковые сигналы.

Повышение надежности иерархической системы может быть обеспечено за счет использования в ЦУ

ПАА функциональных характеристик подсистем, полученных из предыдущих расчетов, в случае несправности соответствующих СУ ПАА или каналов связи между ЦУ ПАА и СУ ПАА. При этом противоаварийное управление в соответствующих подсистемах будет осуществляться узловыми и станционными УПА. При некоторой потере качества управления работоспособность системы при этом будет сохраняться.

Вложенное распараллеливание вычислительных процессов. Наибольшая вычислительная нагрузка ложится на СУ ПАА. Относительно большая часть времени расходуется на расчеты потоков мощностей на каждом шаге приближения к границе области устойчивости.

Расчеты управляющих воздействий необходимо выполнять для каждого заданного вида аварийного возмущения в ЭЭС.

Для ускорения расчетов в СУ ПАА предлагается организовать следующее распараллеливание вычислительных процессов:

- на одном вычислителе выполнять расчеты для заданного подмножества аварийных ситуаций (в пределе может быть задана одна аварийная ситуация);
- расчет потоков мощностей в сложной сети.

Расчет потоков мощностей сводится к решению системы нелинейных уравнений и возможен только итерационными методами. Для расчета потоков мощностей в ЭЭС эффективно применение нелинейных уравнений, полученных методом узловых напряжений. Для решения нелинейных уравнений целесообразно использовать метод Ньютона, являющийся быстроходящимся и, кроме того, обеспечивающим сходимость для режимов, близких к предельным. На каждом шаге итерации новые значения неизвестных находятся из выражения

$$X^{(i+1)} = x^{(i)} - \left[\frac{\partial W}{\partial X} (X^{(i)}) \right]^{-1} W(X^{(i)}), \quad (1)$$

где $X^{(i)}$, $X^{(i+1)}$ — векторы значений неизвестных, полученных на i -й и $(i+1)$ -й итерациях; $\frac{\partial W}{\partial X}$, $W(X^{(i)})$ — матрицы Якоби и нелинейных уравнений системы соответственно.

Итерационный процесс сходится, если функция $W(X)$ становится близкой к нулю.

В качестве нелинейных уравнений для расчета напряжений U в узлах энергосистемы используются следующие уравнения баланса мощности:

$$\omega_{P_k} = P_k - g_{kk} U_k^2 - U_k \sum_{j=1, j \neq k}^n U_j (g_{kj} \cos \delta_{kj} - b_{kj} \sin \delta_{kj}); \quad (2)$$

$$\omega_{Q_k} = Q_k - b_{kk} U_k^2 - U_k \sum_{j=1, j \neq k}^n U_j (b_{kj} \cos \delta_{kj} + g_{kj} \sin \delta_{kj}),$$

где ω_{P_k} , ω_{Q_k} — небалансы активной (P) и реактивной (Q) мощностей для k -го узла; g_{kj} , b_{kj} — вещественная и мнимая составляющие проводимости ветви $[k, j]$; δ_{kj} — угол между векторами напряжений в узлах k и j .

Для ускорения вычислений можно свести нелинейную систему уравнений к линейной на каждом шаге итерации и затем решать ее одним из классических методов. Хорошо поддается распараллеливанию метод

Гаусса путем сведения матрицы A к треугольному виду.

Распараллеливание метода Гаусса осуществляется по строкам матрицы A . Количество строк, решаемых на одном из параллельных вычислителей $n = m/h$, где m — порядок матрицы, а h — число параллельных вычислителей. При этом на каждом шаге смены ведущей строки она должна пересылаться из того параллельного вычислителя, где она оказалась, во все остальные процессоры для выполнения исключения строки.

Если использовать классический алгоритм метода Гаусса, то возникает так называемый Эффект Гайд-на, проявляющийся в том, что по мере исключения переменных преобразованию подвергается все меньшее число строк. Это приводит к тому, что процессоры, на которых размещались строки со старшими номерами, с течением времени остаются без работы.

Чтобы этого избежать и равномерно распределить нагрузку на процессоры, предлагается перенумеровать строки так, чтобы в качестве ведущей брать не следующую по номеру строку, а строку из следующего по номеру процессора, которая не была еще ведущей. Известно, что от перестановки строк в матрице результат не меняется. Строки необходимо разместить так, чтобы на i -м процессоре обрабатывались строки с номерами $i + h(j-1)$, где $j [1, n]$.

Таким образом, с целью минимизации времени вычислений управляющих воздействий предложена процедура вложенного распараллеливания вычислительного процесса (рис.2). Она включает в себя:

- распараллеливание расчетов потоков мощности в электрических сетях;
- организацию распараллеливания вычислений для заданных N групп аварийных возмущений (в пределе может быть выделен отдельный вычислитель для каждого аварийного возмущения);
- распараллеливание вычислений для всех подсистем (электроэнергетических систем) с использованием методов функционального (кибернетического) моделирования.

Процесс вычислений сводится к следующему. Для каждой j -й группы аварийных возмущений последовательно для всех аварийных возмущений, входящих в группу, осуществляются расчеты режимов сети. С целью ускорения расчетов процесс вычисления режима распараллеливается с использованием h_p вычислителей. Расчеты проводятся параллельно в каждой из h_c групп. При завершении расчетов для очередной итерации граничные значения для каждой i -й подсистемы передаются на верхний уровень (ЦУ ПАА) для решения уравнений связи. Для этих целей в ЦУ ПАА может использоваться h_s вычислителей. После решения уравнений связи данные для подсистем передаются обратно на СУ ПАА. Таким образом, процесс вычислений повторяется для всех s итераций, k шагов оптимизации управляющих воздействий и расчетных возмущений для всех подсистем.

Исследования параметров и функциональных характеристик распределенной системы управления. Для определения требований к скорости передачи информации по каналам связи, быстрдействию вычислительных средств и количеству параллельных вычислителей определены функциональные характеристики для времени цикла расчета управляющих воздействий распределенных систем управления и проведены их ис-

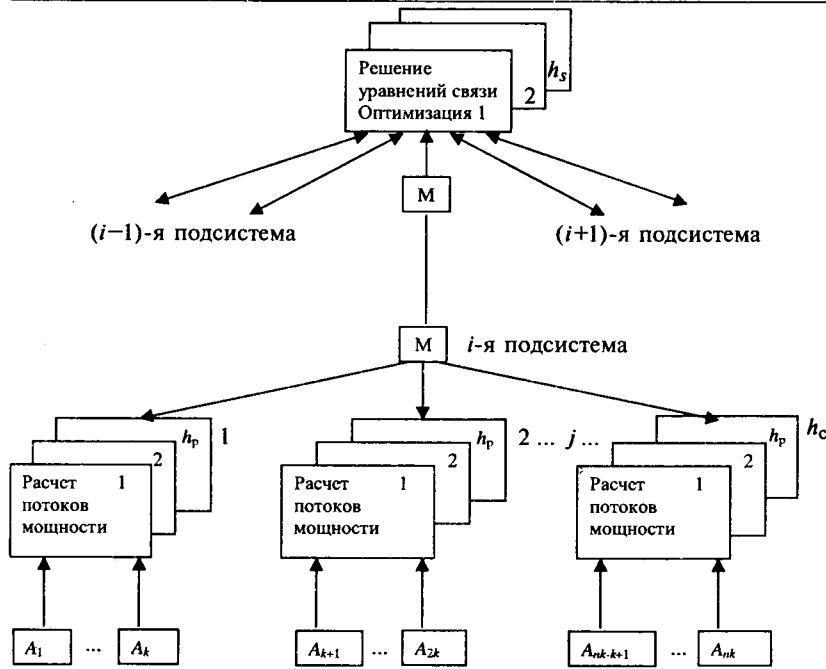


Рис.2. Структурная схема вложенного распараллеливания вычислительного процесса:

A_i — исходные данные для i -го аварийного возмущения; M — устройство передачи информации

следования при вариации различных параметров.

Для организации взаимодействия вычислительных средств подсистем нижнего и верхнего уровней исследованы два режима передачи информации. Первый режим передачи информации — синхронный. Вычислители каждой подсистемы осуществляют расчеты режимов на очередной итерации для всех заданных аварийных возмущений. После этого осуществляется последовательная передача всей информации подсистеме верхнего уровня.

Подсистема верхнего уровня, осуществляет расчет граничных значений переменных путем решения системы уравнений связи. Вычисленные значения граничных переменных передаются в подсистемы нижнего уровня. После этого процедура расчетов повторяется для следующей итерации и последующих шагов оптимизации управляющих воздействий.

Временная диаграмма для первого режима передачи информации представлена на рис.3.

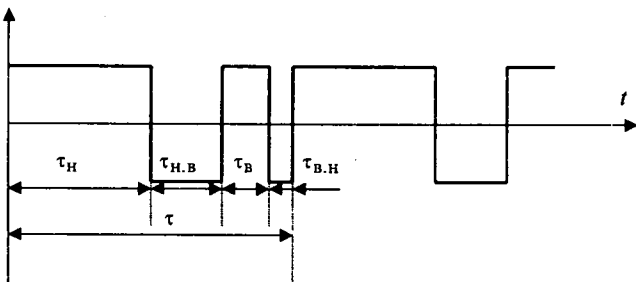


Рис.3. Временная диаграмма для синхронного режима передачи информации: τ_n — время расчета одной итерации вычислителями нижнего уровня; $\tau_{n,v}$ — время передачи информации с нижнего на верхний уровень; τ_v — время решения системы уравнений связи на верхнем уровне; $\tau_{v,n}$ — время передачи информации с верхнего уровня на нижний; цикл расчета $\tau = \tau_n + \tau_{n,v} + \tau_v + \tau_{v,n}$

Второй режим передачи информации — асинхронный. Передача информации в этом режиме осуществляется каждым i -м из h_c вычислителей нижнего уровня после окончания всех расчетов режима сети на очередной итерации, производимых последовательно для каждого из заданных возмущений для i -й группы. Время выполнения операций $(i+1)$ -м вычислителем сдвигается на $\tau = \tau_{n,v} + \tau_v + \tau_{v,n}$. Таким образом, все последующие вычислители заканчивают расчеты режима сети и приступают к передаче информации после окончания приема информации с верхнего уровня предыдущими вычислителями. Если $\tau_n \geq (\tau_{n,v} + \tau_v + \tau_{v,n})(h_c - 1)$, то процесс передачи и приема информации с верхнего уровня от всех вычислителей начиная с $(i+1)$ -го заканчивается до окончания расчета режима сети i -м вычислителем. В этом случае $\tau = \tau_n + \tau_{n,v} + \tau_v + \tau_{v,n}$. В отличие от первого режима передачи информации $\tau_n, \tau_{n,v}, \tau_v, \tau_{v,n}$ определяют времена вычислений и передачи информации

не для всех заданных аварийных возмущений, а только для i -й группы.

Время полного цикла расчета управляющих воздействий для всех заданных аварийных возмущений будет зависеть от времени расчета режима сети, скорости передачи информации по каналам связи, числа заданных аварийных возмущений, количества линий электропередач, связывающих энергосистему с внешними подсистемами, времени решения уравнений связи на верхнем уровне, времени оптимизации управляющих воздействий, количества итераций процесса расчета режима сети, количества шагов оптимизации управляющих воздействий, числа параллельных вычислителей на всех уровнях.

Процесс оптимизации управляющих воздействий может быть возложен как на устройства нижнего уровня, так и на подсистему верхнего уровня.

Поскольку подсистема верхнего уровня осуществляет решения уравнений связи после того, как будут получены функциональные характеристики от всех подсистем, в аналитические выражения для определения времени цикла включены параметры подсистемы, которая последней передает данные на верхний уровень. Как правило, это подсистема с наибольшим количеством узлов сети или числом связей с внешними подсистемами.

На основе анализа процессов расчета режимов сети, системы уравнений связи для определения граничных переменных на верхнем уровне и количества передаваемой информации, получено следующее выражение для времени доаварийного цикла расчетов при оптимизации управляющих воздействий на нижнем уровне:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^p a_i}{h_{cj}} \left[\frac{t_{pj}}{\xi_1 h_{pj}} kc + \frac{t_{yj}}{\xi_2 h_{pj}} (k+1) \right] + [(2x_j)^2 + 4x_j] \times \times N \frac{1}{S} \sum_{i=1}^p kca_i + (\tau_{f1} + \tau_{f2})kc + \frac{\sum_{i=1}^p a_i}{\mu h_s} kct_s \quad (4)$$

где T — время доаварийного цикла расчетов; a_i — количество аварийных ситуаций в i -м энергообъединении; p — количество энергообъединений в единой энергосистеме; h_{cj} — количество параллельных вычислителей в СУ ПАО j -го энергообъединения; t_{pj} — среднее время расчета режима сети на одной итерации без распараллеливания вычислений; h_{pj} — количество параллельных вычислителей, выделяемых для расчета режима сети; ξ_1 — коэффициент эффективности распараллеливания расчета режима сети; $0 < \xi_1 < 1$; t_{yj} — время оптимизации управляющих воздействий на одном шаге; ξ_2 — коэффициент эффективности распараллеливания расчетов оптимизации управляющих воздействий; k — количество шагов оптимизации управляющих воздействий; c — среднее количество итераций расчета режима сети; x_j — количество межсистемных связей j -й подсистемы со всеми внешними подсистемами; z_1 — объем информации, передаваемой с нижнего уровня на верхний уровень; z_2 — объем информации, передаваемой с верхнего уровня на нижний уровень; S — скорость передачи информации по каналам связи в Кбит/с; $z_2 = 2x_j$; $z_1 = (2x_j)^2 + 2x_j$; $N=0,001-16$ для передачи информации двумя байтами; τ_{f1} — время, расходуемое на формирование пакета для передачи информации на нижнем уровне; τ_{f2} — время, расходуемое на формирование пакета для передачи информации на верхнем уровне; t_s — время решения системы уравнений связи для определения граничных переменных на верхнем уровне; h_s — количество параллельных вычислителей верхнего уровня; μ — коэффициент эффективности распараллеливания вычислений на верхнем уровне.

При оптимизации управляющих воздействий на верхнем уровне получаем:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^p a_i t_{pj}}{h_{cj} \xi_1 h_{pj}} kc + \left\{ \left[(2x_j)^2 + 4x_j \right] kc + y_j (k+1) \right\} N \frac{1}{S} \sum_{i=1}^p a_i + (\tau_{f1} + \tau_{f2}) kc + \sum_{i=1}^p a_i \left[\frac{t_y}{\mu_1 h_s} (k+1) + \frac{t_s}{\mu_2 h_s} kc \right], \quad (5)$$

где y_j — количество управляющих воздействий, передаваемых с верхнего уровня j -му энергообъединению.

Аналогичные выражения были получены также для асинхронного режима передачи информации. Исследования функциональных характеристик при всевозможных вариациях параметров показывают, что допустимые значения доаварийного цикла расчетов T для асинхронного режима передачи информации получаются в 1,5–2 раза меньше по сравнению с синхронным режимом передачи информации (рис.4).

Определение требований к скорости передачи информации. При организации вычислений с использованием методов кибернетического (функционального) моделирования довольно жесткие требования предъявляются к скорости передачи информации, поскольку необходимо осуществлять обмен информацией между верхним и нижними уровнями на каждом цикле итерационного процесса расчета потокораспределения электрической сети.

Проведем оценку допустимой скорости передачи информации для максимальных значений параметров ($a_j = 25$; $p = 6$; $c = 6$; $k = 10$; $x = 30$; $t_s = 0,2t_p$) и первого режима передачи информации. Подставляя

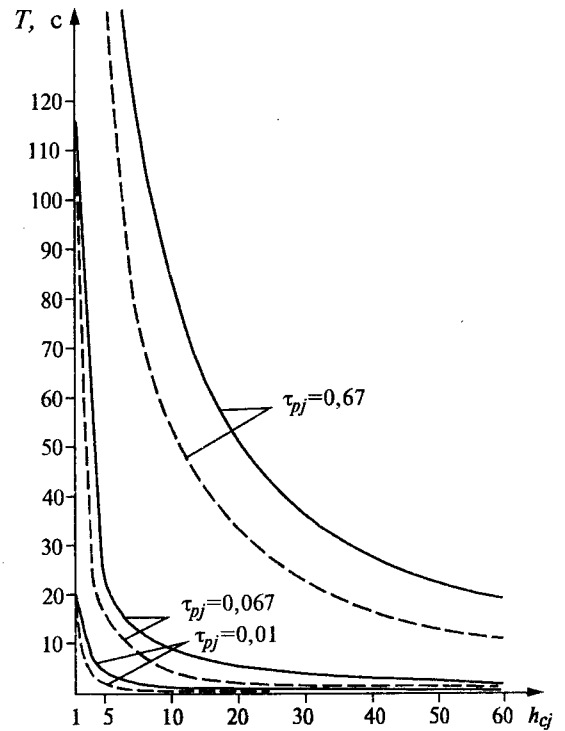


Рис.4. Зависимость времени доаварийного цикла расчетов от количества вычислителей:

— 1-й режим передачи информации; ---- 2-й режим передачи информации

соответствующие значения исходных параметров в

выражение (4) и принимая обозначение $\tau_{pj} = \frac{t_{pj}}{h_{pj}}$,

получаем:

$$T = 12870 \frac{\tau_{pj}}{h_{cj}} + 535680 \frac{1}{S} + 1800 \frac{\tau_{pj} h_{pj}}{h_s};$$

при $h_{pj} = 10$

$$T = 12870 \frac{\tau_{pj}}{h_{cj}} + 18000 \frac{\tau_{pj}}{h_s} + 535680 \frac{1}{S}. \quad (6)$$

Из (6) следует

$$\tau_{pj} = \left(T - 535680 \frac{1}{S} \right) \frac{h_{cj} h_s}{12870 h_s + 18000 h_{cj}}.$$

Предельные значения скоростей передачи информации определяются из выражения

$$T - 535680 \frac{1}{S} > 0. \quad (7)$$

Из (7)

$$S > \frac{535680}{T}.$$

Для оценки нижнего ограничения примем $T = 5$ с. Тогда

$$S > 107,136 \text{ Мбит/с}. \quad (8)$$

Из полученного ограничения (8) можно заключить, что организация вычислений с использованием методов кибернетического моделирования возможна только с применением оптоволоконных линий связи.

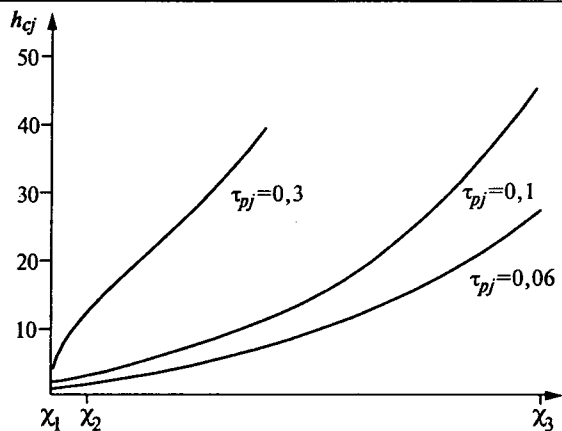


Рис.5. Зависимость количества вычислителей от параметров системы

Проведенные исследования позволяют определить требования к быстродействию применяемых для противоаварийного управления вычислительных средств и количеству параллельных вычислителей. Из выражений (4),(5) можно заметить, что утяжеление исходных параметров в основном определяется произ-

ведением трех составляющих $\sum_{i=1}^p kca_i$. Если представить указанное произведение в виде обобщенного па-

раметра $\chi = \sum_{i=1}^p kca_i$, то для заданного общего времени

расчета управляющих воздействий T из полученных зависимостей $T = \Psi(\tau_{pj}, h_{cj})$ и $\tau_{pj} = f(T, h_{cj})$ можно получить зависимости предельных значений $\tau_{pj} = \Phi_1(h_{cj}, \chi)$ и $h_{cj} = \Phi_2(\tau_{pj}, \chi)$. На рис.5 приведены зависимости $h_{cj} = \Phi_2(\tau_{pj}, \chi)$ при $T = 30$ с. Точка χ_1 соответствует минимальному значению исходных параметров системы, точка χ_2 — среднему значению, а точка χ_3 — максимальному значению исходных параметров. По функциональным зависимостям, представленным на рис.5, можно определить количество параллельных вычислителей h_{cj} в зависимости от заданного времени τ_{pj} и обобщенного параметра χ .

Уточнение параметров t_{pj} , h_{cj} и h_s должно осуществляться по приведенным выше уравнениям.

Выводы

1. Разработана структура и алгоритмы работы распределенной системы противоаварийного управления с использованием многоуровневого распараллеливания вычислений управляющих воздействий в допустимом доаварийном цикле расчетов (реальном масштабе времени) для заданного множества аварийных возмущений. Применены принципы функционально-

го (кибернетического) моделирования энергосистем, позволяющие проводить вычисление режима всей энергосистемы параллельно в каждой из подсистем, предложены принципы распараллеливания решений систем линейных уравнений методом Гаусса и параллельная организация вычислений УВ для пусковых органов.

2. Предложены и исследованы синхронный и асинхронный режимы передачи информации между нижними и верхними уровнями распределенной системы управления. Получены аналитические функциональные зависимости общего времени цикла расчета управляющих воздействий от исходных параметров системы для исследуемых режимов передачи информации. В результате проведенных исследований рекомендован для практического использования асинхронный режим передачи информации, где обмен информацией происходит после окончания всех расчетов i -м вычислителем, а время обработки информации $(i+1)$ -м вычислителем по сравнению с i -м вычислителем сдвинуто на время передачи информации на верхний уровень, время работы верхнего уровня и время передачи информации — на нижний уровень.

3. Определены требования к скорости передачи информации между нижними и верхними уровнями распределенной системы управления. Показано, что для поставленной задачи могут быть применены только высокоскоростные (оптоволоконные) каналы связи со скоростью передачи информации не ниже 144 Мбит/с.

4. Получены обобщенные функциональные зависимости, позволяющие определить количество параллельных вычислителей, необходимых для одновременного расчета управляющих воздействий для различных аварийных ситуаций в зависимости от вычислительной мощности планируемых к применению рабочих станций с параллельной обработкой информации, размерности энергосистемы, общего количества расчетных аварийных ситуаций в ЕЭС и эффективности применяемых методов расчета режима сети и оптимизации управляющих воздействий.

Список литературы

1. Ковалев В.Д. Иерархические системы противоаварийного управления//Электротехника. 1985. № 9. С. 43—46.
2. Богуславский Л.А., Ковалев В.Д., Шевченко А.Т. Устройство противоаварийной автоматики для сохранения устойчивости параллельной работы электростанций//Электрические станции. 1985. № 10.
3. Бердников В.И., Биргель Э.Р., Ковалев В.Д. и др. Иерархическая система противоаварийной автоматики сети 500 кВ ОЭС Поволжья//Электротехника. 1996. №9.
4. Ковалев В.Д. Алгоритмы управляющих воздействий противоаварийной автоматики электроэнергетических систем//Электричество. 1981. №12.
5. Веников В.А., Суханов О.А. Кибернетические модели электрических систем. М.: Энергоиздат, 1982.

Исследование характеристик сверхпроводящего индуктивного накопителя с преобразователем на основе инвертора напряжения

ИВАКИН В.Н.

Изложены методы расчета характеристик сверхпроводящего накопителя электрической энергии (СПИНЭ) с преобразователем на основе инвертора напряжения. Рассмотрены алгоритмы управления преобразователем. Представлены примеры и результаты расчета режимов работы электроэнергетической системы со СПИНЭ.

Развитие объединенных электроэнергетических систем (ЭЭС), рост генерирующих мощностей неизбежно приводит к усложнению схем ЭЭС, что, в свою очередь, приводит к усложнению систем управления режимами работы ЭЭС. Для обеспечения надежности работы больших ЭЭС вводится целый ряд ограничений и условий на формирование и режимы работы межсистемных связей, что ограничивает их эффективность. Рост потоков мощности по электропередачам постоянно увеличивает требования к устройствам и системам, обеспечивающим повышение статической и динамической устойчивости систем, связанных с возникновением качаний обменной мощности при возмущениях.

Вопросы поддержания динамической устойчивости ЭЭС при различных авариях решаются в основном системной автоматикой. При этом отключаются не только аварийные объекты, но и часть потребителей. Использование электрических станций (ЭС) для поддержания устойчивости возможно лишь при наличии "горячего резерва", что крайне неэкономично. Эффективными и перспективными устройствами, позволяющими решать эти задачи, являются накопители электроэнергии (НЭЭ) — устройства для частичного или полного разделения во времени процесса выработки и потребления электроэнергии [1]. Одним из наиболее перспективных типов устройств НЭЭ является сверхпроводящий индуктивный накопитель электроэнергии (СПИНЭ), содержащий, кроме собственно индуктивного накопителя, мощный вентильный преобразователь (ВП). СПИНЭ является, по существу, быстродействующим регулятором активной и реактивной мощности [2,3].

Успехи в области технологии сверхпроводимости, силовой полупроводниковой электроники, микропроцессорных систем управления позволяют уже в настоящее время реализовывать на практике проекты СПИНЭ с энергоемкостью 10^8 – 10^9 Дж [4]. Особый интерес представляет применение в СПИНЭ преобразователей на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, что также связано с успехами в технологии производства мощных полностью управляемых полупроводниковых приборов на большие токи и напряжения. Это делает реальной задачу создания на их базе мощных быстродействующих многофункциональных устройств, которые принципиально могут не только потреблять, но и генерировать как реактивную, так и активную мощность, обеспечивая работу устройства во всех четырех квадрантах PQ -диаграммы, причем с независимым регулированием активной и реактивной мощностей [5–9]. Такие СПИНЭ могут найти широкое применение как в электро-

энергетических системах (ЭЭС) при решении различных задач и проблем, возникающих в процессе развития ЭЭС, так и в системах электроснабжения предприятий и других объектов для повышения качества электроснабжения и снижения технологических ущербов, связанных с возникающими в питающей энергосистеме аварийными ситуациями.

Многофункциональность СПИНЭ определяется прежде всего возможностью применения этого устройства для:

- увеличения пределов передаваемой мощности ЛЭП;
- сглаживания нерегулярных колебаний мощности в ЛЭП, связывающих отдельные части энергосистемы или разные энергосистемы;
- демпфирования электромеханических процессов в ЭЭС в послеаварийных режимах;
- поддержания уровней напряжений в узлах ЭЭС;
- выравнивания суточных графиков нагрузки и т.п.

Разумеется, для решения разных задач СПИНЭ должен обладать различной энергоемкостью. Для выравнивания суточных графиков нагрузки необходим накопитель большой емкости (10^7 – 10^8 МДж) с катушкой большого размера (сотни метров в диаметре). Для демпфирования электромеханических процессов необходимы быстродействующие накопители средней емкости (порядка 10^2 – 10^3 МДж).

ВП, входящий в состав СПИНЭ для связи накопителя электрической энергии с энергосистемой, необходим не только для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока и обратно с возможно большим КПД, но и для управления при этом процессами заряда и разряда НЭЭ, который сам по себе не имеет средств управления. Согласование ВП с сетью переменного тока по току и напряжению обеспечивает трансформатор, входящий в состав СПИНЭ. По отношению к энергосистеме НЭЭ вместе с ВП должны рассматриваться как единый энергетический объект, характеристики которого определяются параметрами НЭЭ и преобразователя с учетом принципов управления.

Известны различные схемы преобразователей, которые могут быть использованы в составе НЭЭ [10]. Наибольшее применение нашли схемы, выполненные на базе трехфазной мостовой схемы. В зависимости от используемой элементной базы можно выделить две группы схем — на основе применения силовых полупроводниковых тиристоров (Thyristors, SCR) и на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, среди которых следует выделить биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistors) и запираемые ти-

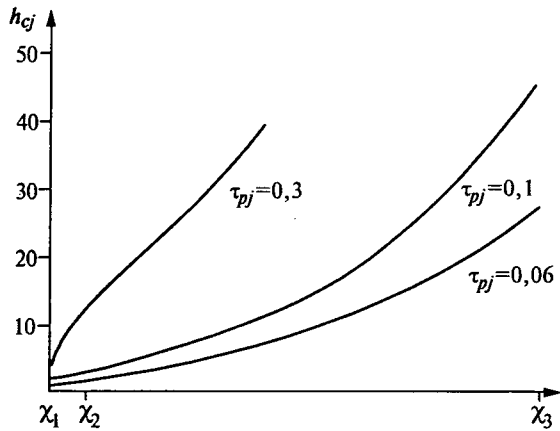


Рис.5. Зависимость количества вычислителей от параметров системы

Проведенные исследования позволяют определить требования к быстродействию применяемых для противоаварийного управления вычислительных средств и количеству параллельных вычислителей. Из выражений (4),(5) можно заметить, что утяжеление исходных параметров в основном определяется произ-

ведением трех составляющих $\sum_{i=1}^p kca_i$. Если представить указанное произведение в виде обобщенного па-

раметра $\chi = \sum_{i=1}^p kca_i$, то для заданного общего времени

расчета управляющих воздействий T из полученных зависимостей $T = \Psi(\tau_{pj}, h_{cj})$ и $\tau_{pj} = f(T, h_{cj})$ можно получить зависимости предельных значений $\tau_{pj} = \Phi_1(h_{cj}, \chi)$ и $h_{cj} = \Phi_2(\tau_{pj}, \chi)$. На рис.5 приведены зависимости $h_{cj} = \Phi_2(\tau_{pj}, \chi)$ при $T = 30$ с. Точка χ_1 соответствует минимальному значению исходных параметров системы, точка χ_2 — среднему значению, а точка χ_3 — максимальному значению исходных параметров. По функциональным зависимостям, представленным на рис.5, можно определить количество параллельных вычислителей h_{cj} в зависимости от заданного времени τ_{pj} и обобщенного параметра χ .

Уточнение параметров τ_{pj} , h_{cj} и h_s должно осуществляться по приведенным выше уравнениям.

Выводы

1. Разработана структура и алгоритмы работы распределенной системы противоаварийного управления с использованием многоуровневого распараллеливания вычислений управляющих воздействий в допустимом доаварийном цикле расчетов (реальном масштабе времени) для заданного множества аварийных возмущений. Применены принципы функционально-

го (кибернетического) моделирования энергосистем, позволяющие проводить вычисление режима всей энергосистемы параллельно в каждой из подсистем, предложены принципы распараллеливания решений систем линейных уравнений методом Гаусса и параллельная организация вычислений УВ для пусковых органов.

2. Предложены и исследованы синхронный и асинхронный режимы передачи информации между нижними и верхними уровнями распределенной системы управления. Получены аналитические функциональные зависимости общего времени цикла расчета управляющих воздействий от исходных параметров системы для исследуемых режимов передачи информации. В результате проведенных исследований рекомендован для практического использования асинхронный режим передачи информации, где обмен информацией происходит после окончания всех расчетов i -м вычислителем, а время обработки информации $(i+1)$ -м вычислителем по сравнению с i -м вычислителем сдвинуто на время передачи информации на верхний уровень, время работы верхнего уровня и время передачи информации — на нижний уровень.

3. Определены требования к скорости передачи информации между нижними и верхними уровнями распределенной системы управления. Показано, что для поставленной задачи могут быть применены только высокоскоростные (оптоволоконные) каналы связи со скоростью передачи информации не ниже 144 Мбит/с.

4. Получены обобщенные функциональные зависимости, позволяющие определить количество параллельных вычислителей, необходимых для одновременного расчета управляющих воздействий для различных аварийных ситуаций в зависимости от вычислительной мощности планируемых к применению рабочих станций с параллельной обработкой информации, размерности энергосистемы, общего количества расчетных аварийных ситуаций в ЕЭС и эффективности применяемых методов расчета режима сети и оптимизации управляющих воздействий.

Список литературы

1. Ковалев В.Д. Иерархические системы противоаварийного управления//Электротехника. 1985. № 9. С. 43—46.
2. Богуславский Л.А., Ковалев В.Д., Шевченко А.Т. Устройство противоаварийной автоматики для сохранения устойчивости параллельной работы электростанций//Электрические станции. 1985. № 10.
3. Бердников В.И., Биргель Э.Р., Ковалев В.Д. и др. Иерархическая система противоаварийной автоматики сети 500 кВ ОЭС Поволжья//Электротехника. 1996. №9.
4. Ковалев В.Д. Алгоритмы управляющих воздействий противоаварийной автоматики электроэнергетических систем//Электричество. 1981. №12.
5. Веников В.А., Суханов О.А. Кибернетические модели электрических систем. М.: Энергоиздат, 1982.

Исследование характеристик сверхпроводникового индуктивного накопителя с преобразователем на основе инвертора напряжения

ИВАКИН В.Н.

Изложены методы расчета характеристик сверхпроводникового накопителя электрической энергии (СПИНЭ) с преобразователем на основе инвертора напряжения. Рассмотрены алгоритмы управления преобразователем. Представлены примеры и результаты расчета режимов работы электроэнергетической системы со СПИНЭ.

Развитие объединенных электроэнергетических систем (ЭЭС), рост генерирующих мощностей неизбежно приводит к усложнению схем ЭЭС, что, в свою очередь, приводит к усложнению систем управления режимами работы ЭЭС. Для обеспечения надежности работы больших ЭЭС вводится целый ряд ограничений и условий на формирование и режимы работы межсистемных связей, что ограничивает их эффективность. Рост потоков мощности по электропередачам постоянно увеличивает требования к устройствам и системам, обеспечивающим повышение статической и динамической устойчивости систем, связанных с возникновением качаний обменной мощности при возмущениях.

Вопросы поддержания динамической устойчивости ЭЭС при различных авариях решаются в основном системной автоматикой. При этом отключаются не только аварийные объекты, но и часть потребителей. Использование электрических станций (ЭС) для поддержания устойчивости возможно лишь при наличии "горячего резерва", что крайне неэкономично. Эффективными и перспективными устройствами, позволяющими решать эти задачи, являются накопители электроэнергии (НЭЭ) — устройства для частичного или полного разделения во времени процесса выработки и потребления электроэнергии [1]. Одним из наиболее перспективных типов устройств НЭЭ является сверхпроводниковый индуктивный накопитель электроэнергии (СПИНЭ), содержащий, кроме собственно индуктивного накопителя, мощный вентильный преобразователь (ВП). СПИНЭ является, по существу, быстродействующим регулятором активной и реактивной мощности [2,3].

Успехи в области технологии сверхпроводимости, силовой полупроводниковой электроники, микропроцессорных систем управления позволяют уже в настоящее время реализовывать на практике проекты СПИНЭ с энергоемкостью 10^8 — 10^9 Дж [4]. Особый интерес представляет применение в СПИНЭ преобразователей на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, что также связано с успехами в технологии производства мощных полностью управляемых полупроводниковых приборов на большие токи и напряжения. Это делает реальной задачу создания на их базе мощных быстродействующих многофункциональных устройств, которые принципиально могут не только потреблять, но и генерировать как реактивную, так и активную мощность, обеспечивая работу устройства во всех четырех квадрантах PQ -диаграммы, причем с независимым регулированием активной и реактивной мощностей [5—9]. Такие СПИНЭ могут найти широкое применение как в электро-

энергетических системах (ЭЭС) при решении различных задач и проблем, возникающих в процессе развития ЭЭС, так и в системах электроснабжения предприятий и других объектов для повышения качества электроснабжения и снижения технологических ущербов, связанных с возникающими в питающей энергосистеме аварийными ситуациями.

Многофункциональность СПИНЭ определяется прежде всего возможностью применения этого устройства для:

- увеличения пределов передаваемой мощности ЛЭП;
- сглаживания нерегулярных колебаний мощности в ЛЭП, связывающих отдельные части энергосистемы или разные энергосистемы;
- демпфирования электромеханических процессов в ЭЭС в послеаварийных режимах;
- поддержания уровней напряжений в узлах ЭЭС;
- выравнивания суточных графиков нагрузки и т.п.

Разумеется, для решения разных задач СПИНЭ должен обладать различной энергоемкостью. Для выравнивания суточных графиков нагрузки необходим накопитель большой емкости (10^7 — 10^8 МДж) с катушкой большого размера (сотни метров в диаметре). Для демпфирования электромеханических процессов необходимы быстродействующие накопители средней емкости (порядка 10^2 — 10^3 МДж).

ВП, входящий в состав СПИНЭ для связи накопителя электрической энергии с энергосистемой, необходим не только для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока и обратно с возможно большим КПД, но и для управления при этом процессами заряда и разряда НЭЭ, который сам по себе не имеет средств управления. Согласование ВП с сетью переменного тока по току и напряжению обеспечивает трансформатор, входящий в состав СПИНЭ. По отношению к энергосистеме НЭЭ вместе с ВП должны рассматриваться как единый энергетический объект, характеристики которого определяются параметрами НЭЭ и преобразователя с учетом принципов управления.

Известны различные схемы преобразователей, которые могут быть использованы в составе НЭЭ [10]. Наибольшее применение нашли схемы, выполненные на базе трехфазной мостовой схемы. В зависимости от используемой элементной базы можно выделить две группы схем — на основе применения силовых полупроводниковых тиристоров (Thyristors, SCR) и на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, среди которых следует выделить биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistors) и запираемые ти-

ристоры (GTO — Gate Turn-Off Thyristor, GCT — Gate Commutated Thyristor, IGCT — Integrated Gate Commutated Thyristor). В настоящее время мощные силовые тиристоры (SCR) имеют наибольшие значения коммутируемых напряжения (до 8 кВ) и тока (до 4 кА). Среди полностью управляемых приборов в настоящее время IGBT обеспечивают коммутацию токов до 1800 А и напряжений до 4,5 кВ. Новый класс запираемых тиристоров, коммутируемых по затвору (GCT и IGCT), появившийся в последнее время, позволяет достигнуть скорость коммутации тока 1000–3000 А/мкс. В результате почти на порядок, по сравнению с GTO, уменьшаются времена коммутации, снижаются коммутационные потери. IGCT имеет интегрированный на одном кристалле с GCT обратный быстроосстанавливающийся диод. Достигнутая технология позволяет выпускать в настоящее время GCT на токи до 3 кА, напряжением до 5,5 кВ, а IGCT — на токи до 4 кА и напряжение до 4,5 кВ. Таким образом, элементная база уже в настоящее время дает возможность создавать полностью управляемые преобразователи для СПИНЭ мощностью более 100 МВт.

Характеристики СПИНЭ с преобразователями на основе силовых тиристоров, работающих по схеме и режиму источника тока, довольно подробно рассмотрены [1–4], в то время как с преобразователями на основе полностью управляемых тиристоров, работающими в режиме источника напряжения, особенно в отечественной литературе, практически не рассмотрены. Применение инверторов напряжения в схеме СПИНЭ представляет несомненный интерес, так как позволяет существенно повысить коммутационную устойчивость преобразователя в переходных режимах и, кроме того, исключить мощные силовые конденсаторные батареи, необходимые для обеспечения выдачи реактивной мощности.

На рис.1 представлена принципиальная схема многофункционального устройства (МФУ) на основе СПИНЭ, которая может обеспечить быстроедействие и независимое управление P и Q , решать разнообразные задачи в энергосистеме, включая регулирование напряжения, компенсацию реактивной мощности, демпфирование колебаний мощности в системе и т.д.

Принципиальная схема этого МФУ содержит преобразователь на основе схемы инвертора напряжения (на запираемых тиристорах $T1-T6$ и диодах $D1-D6$), конденсаторной батареи емкостью C на стороне постоянного тока преобразователя, двухтактный преобразователь на основе мостовой схемы — чоппер (на запираемых тиристорах $T7-T8$ и диодах $D7-D8$) и сверхпроводящей катушки (СПК) индуктивности L_n , включенной в диагональ моста. Чоппер обеспечивает согласование источника тока, каким является СПК, с источником напряжения, каким является емкость C на стороне постоянного тока инвертора напряжения.

Рассмотрим процесс накопления, хранения и выдачи энергии, которые обеспечиваются работой чоппера. Кроме этого, чоппер обеспечивает поддержание необходимого напряжения на конденсаторе.

Все накопители электрической энергии, базирующиеся на СПИНЭ, характеризуются рядом энергетических соотношений, определяющих в том числе и динамические характеристики этих многофункциональных устройств.

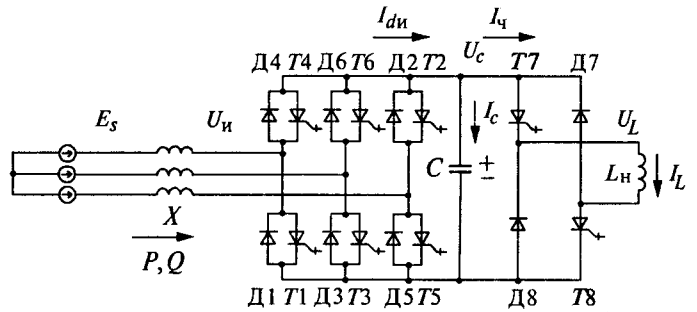


Рис.1. Принципиальная схема МФУ

Энергия, запасенная в СПИНЭ, в любой момент времени t_1

$$W_1 = \frac{L i^2}{2} = W_0 + \int_0^{t_1} u(t) i(t) dt, \quad (1)$$

где W_0 — начальная энергия в накопителе в момент $t = 0$ и при токе i_0 ; L — индуктивность сверхпроводящей катушки.

Напряжение на катушке

$$u(t) = L di/dt. \quad (2)$$

Соответственно, ток через катушку определяется выражением

$$i(t_1) = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^{t_1} u(t) dt, \quad (3)$$

где i_0 — ток в катушке в момент $t = 0$.

В процессе заряда СПИНЭ энергия в накопителе возрастает и $W_1 > W_0$, а в процессе разряда энергия в накопителе уменьшается и $W_1 < W_0$. В зависимости от способа управления тиристорами чоппера возможны следующие режимы работы накопителя (обозначения приводятся в соответствии с рис.1):

Режим 1. Работа по алгоритму регулирования среднего значения напряжения на катушке. Запираемые тиристоры $T7$ и $T8$ одновременно находятся либо в открытом, либо в закрытом состоянии. Относительное время открытого состояния тиристоров $d = T_o/T$, где $T = T_o + T_3$; T_o и T_3 — периоды времени, в течение которых тиристоры соответственно открыты и закрыты. Когда и $T7$ и $T8$ открыты, напряжение на катушке накопителя $u_L = u_c$, ток в катушке накопителя возрастает со скоростью $di_L/dt = \bar{U}_C/L_n$, происходит процесс накопления энергии. Когда тиристоры $T7$ и $T8$ закрыты, открываются диоды $D7$ и $D8$ и $u_L = -u_c$, ток в катушке накопителя уменьшается со скоростью

$di_L/dt = -\bar{U}_C/L_n$, происходит разряд энергии. Используя относительное время открытого состояния тиристоров d как параметр регулирования, т.е. регулируя длительность отрезков времени, в течение которых к катушке накопителя прикладывается напряжение u_c или $-u_c$, можно регулировать процесс заряда, разряда или хранения энергии. Среднее напряжение на катушке может быть определено в виде уравнения

$$\bar{U}_L = (2d - 1)\bar{U}_C; \quad (4)$$

средний ток чоппера

$$\bar{I}_q = (2d - 1)\bar{I}_L, \quad (5)$$

где \bar{I}_L — средний ток катушки.

При $d = 0,5$ среднее значение напряжения на катушке равно нулю, поэтому обеспечивается режим хранения энергии.

Этот режим работы чоппера вызывает дополнительные пилообразные пульсации на конденсаторе. Оценка пульсаций напряжения на конденсаторе в процессе цикла работы чоппера может быть сделана на основе анализа процесса энергообмена между катушкой и конденсатором. При этом следует учитывать, что значение емкости конденсатора не влияет на энергетические характеристики устройства в целом и энергоемкость конденсатора на несколько порядков меньше энергоемкости СПК. Период работы чоппера выбирается таким, чтобы изменения напряжения на конденсаторе за этот период были значительно меньше его среднего значения. В этом случае можно принять, что ток в катушке практически не меняется, т.е. $I_L = \text{const}$, а напряжение на конденсаторе определяется выражением

$$u(t_1) = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^{t_1} i(t) dt = u_0 + \frac{I_L}{C} t_1, \quad (6)$$

где u_0 — напряжение на конденсаторе в момент $t = 0$, а $t_1 < T$.

Управляя энергообменом между катушкой и конденсатором, можно поддерживать заданный уровень напряжения на конденсаторе и, следовательно, выходное напряжение инвертора. Постоянные коммутации вентиля чоппера, частота которых может составлять 2—5 кГц, и вызываемые ими пульсации напряжения и тока на конденсаторе и в катушке приводят, естественно, к дополнительным потерям в схеме устройства, поэтому длительный режим хранения энергии может быть реализован и другими алгоритмами работы вентиля чоппера.

Режим 2. Работа по алгоритму хранения энергии в катушке с разрядом. Тиристор $T8$ в этом режиме всегда находится в закрытом состоянии. Режим хранения обеспечивается при открытом состоянии тиристора $T7$. При этом катушка накопителя закорачивается через диод $D7$ и тиристор $T7$, поэтому напряжение на ней мало и равно сумме падений напряжения на $D7$ и $T7$. Для выдачи энергии из катушки накопителя в систему тиристор $T7$ закрывается. При таком алгоритме управления работой чоппера напряжение $-u_C$ приложено к катушке только в период разряда, при этом потери меньше, чем при режиме 1.

Режим 3. Работа по алгоритму хранения энергии в катушке с подзарядом. Тиристор $T8$ в этом режиме всегда находится в открытом состоянии. Режим хранения обеспечивается при закрытом состоянии тиристора $T7$. При этом катушка замкнута через тиристор $T8$ и диод $D8$, напряжение на ней мало и равно сумме падений напряжений на $T8$ и $D8$. Однако в контуре всегда существуют потери, поэтому периодически необходима подзарядка энергии в катушке. Для подзарядки катушки необходимо открыть тиристор $T7$. При этом к катушке будет приложено напряжение u_C и через тиристоры $T7$ и $T8$ будет происходить процесс заряда. Такой режим обеспечивает минимизацию потерь энергии (как и режиме 2).

Для анализа энергетических характеристик и выбора алгоритмов управления преобразователями рас-

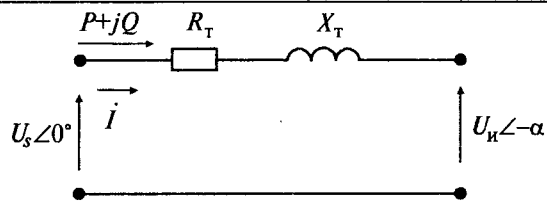


Рис.2. Схема замещения МФУ

сматриваемой схемы МФУ воспользуемся упрощенной схемой замещения, показанной на рис.2.

На рис.2 U_s — напряжение на шинах системы; U_n — напряжение инвертора; α — угол сдвига вектора напряжения U_n относительно U_s ; P, Q — соответственно активная и реактивная мощности, потребляемые МФУ из системы (или выдаваемые в систему); за положительное принято направление мощности от системы в МФУ; I — ток МФУ (он же — ток системы в данной схеме замещения); R_T, X_T — соответственно эквивалентные последовательные активное и реактивное сопротивления МФУ, включающие сопротивление трансформатора, а также дополнительных реакторов (при наличии их в схеме).

Приведенная схема замещения описывается следующими уравнениями:

$$I = \dot{S} / \dot{U}_s = (P - jQ) / \dot{U}_s = (\dot{U}_s - \dot{U}_n) / (R_T + jX_T); \quad (7)$$

$$\dot{U}_n = \dot{U}_s - I(R_T + jX_T) = U_{nR} - jU_{nX} = U_n \angle -\alpha, \quad (8)$$

где U_n, U_{nR} и U_{nX} — модуль, активная и реактивная составляющие напряжения инвертора,

$$U_{nR} = U_n \cos(\alpha) = U_s - [PR_T + QX_T] / U_s; \quad (9)$$

$$U_{nX} = U_n \sin(\alpha) = [PX_T - QR_T] / U_s; \quad (10)$$

$$U_n = \sqrt{U_{nR}^2 + U_{nX}^2}; \quad (11)$$

$$\alpha = \arctan(U_{nX} / U_{nR}). \quad (12)$$

Действующее значение напряжения инвертора U_n связано с напряжением на стороне постоянного тока инвертора (среднее значение напряжения на конденсаторе) через коэффициент, учитывающий схему инвертора и принцип коммутации вентиля в схеме инвертора. Для рассматриваемой трехфазной мостовой схемы без применения широтно-импульсного принципа управления коммутациями вентиля

$$U_n = \sqrt{2} \bar{U}_C / \pi.$$

Источником и потребителем активной мощности в СПИНЭ является СПК. Учитывая, что регулирование процессом выдачи и потребления активной мощности в схеме СПИНЭ осуществляется с помощью чоппера, значение активной мощности удобно определить через средние значения за период работы чоппера с учетом (5) в виде выражения

$$\bar{P}_q = \bar{U}_C \bar{I}_q = \bar{U}_C (2d - 1) \bar{I}_L, \quad (13)$$

откуда необходимый для целей регулирования параметр d определится как

$$d = 0,5 + \bar{P}_q / 2 / \bar{U}_C / \bar{I}_L. \quad (14)$$

Мощность \bar{P}_q отличается от P на значение актив-

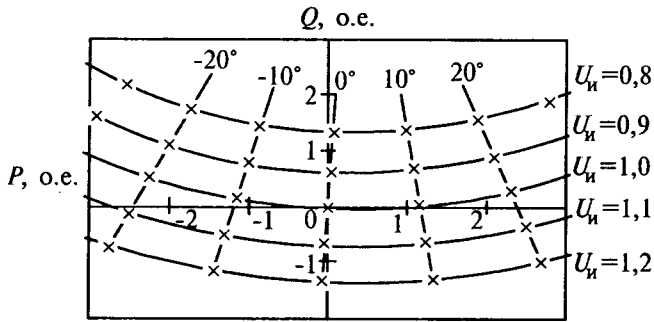


Рис.3. Зависимости P^* от Q^* , построенные при $U_{и} = \text{const}$ и $\alpha = \text{const}$

ных потерь в схеме СПИНЭ. Пренебрегая потерями в преобразователях и в соответствии с расчетной схемой можно записать:

$$\bar{P}_ч = P - (P^2 + Q^2) R_t / U_s^2. \quad (15)$$

Учитывая, что угол α , определяемый на основе уравнений (7)–(12), является углом управления вентилей в схеме инвертора напряжения, эти уравнения вместе с (14) и (15) описывают все основные соотношения параметров схемы СПИНЭ, позволяя определить основные энергетические характеристики и реализовать систему регулирования. Для анализа энергетических характеристик СПИНЭ удобнее использовать относительные единицы. Примем за базисные величины: номинальное напряжение системы U_s и номинальную мощность трансформатора S_t , входящего в состав СПИНЭ для связи преобразователя с системой. При этом из уравнений (9) и (10) можно получить следующие выражения для расчета активной и реактивной мощностей в относительных единицах:

$$P_* = (R_* - U_{и} R_* \cos \alpha + U_{и} \sin \alpha) / (X_* (R_*^2 + 1)); \quad (16)$$

$$Q_* = (1 - U_{и} R_* \sin \alpha - U_{и} R_* \cos \alpha) / (X_* (R_*^2 + 1)), \quad (17)$$

где $R_* = R/X$.

На рис.3 показаны расчетные зависимости P_* от Q_* , построенные для ряда значений напряжений инвертора при изменении угла α .

Анализ представленных выражений и расчетных кривых позволяет сделать вывод, что при постоянном напряжении инвертора значение потребляемой или выдаваемой активной мощности P_* в основном зависит от угла α . Реактивная мощность Q_* от угла α зависит мало и определяется, в основном, значением напряжения инвертора, которое, при постоянстве угла α , определяется значением d' чоппера.

Следует отметить такие важные свойства рассматриваемого устройства для условий его работы в ЭЭС, как положительный

регулирующий эффект по напряжению и устойчивая работа при глубоких симметричных и несимметричных провалах напряжения, вызываемых короткими замыканиями в ЭЭС. Даже без регулирования угла α , снижение напряжения в сети приводит к увеличению реактивной мощности устройства, а повышение напряжения — к снижению реактивной мощности, так как при постоянстве $U_{и}$ это эквивалентно увеличению или снижению, соответственно, относительного значения напряжения инвертора, что благоприятно сказывается на поддержании напряжения в сети. Рассматриваемая схема МФУ ведет себя в этом случае подобно синхронной машине.

Для исследования электромагнитных переходных процессов в схеме и динамических характеристик СПИНЭ была разработана трехфазная цифровая модель, блок-схема которой показана на рис.4, отражающая принципиальную силовую схему, а также систему управления и регулирования.

Для иллюстрации возможностей регулирования активной и реактивной мощностей, а также возможности работы устройства во всех четырех квадрантах PQ -диаграммы, на рис.5 приведены расчетные осциллограммы активной и реактивной мощностей (P и Q), напряжения на стороне постоянного тока преобразователя П1 (напряжение на емкости U_c), угла управления П1 (α) и параметра управления преобразователя П2 (d), полученные при моделировании данной схемы СПИНЭ и при задании частоты и амплитуды изменения активной мощности в два раза меньше, чем частота и амплитуда изменения реактивной мощности.

На осциллограммах положительные значения активной и реактивной мощностей соответствуют потреблению мощности МФУ из системы, а отрицательные — выдаче мощности МФУ в систему.

Следует также отметить, что на выбор способа управления энергообменом между накопителем и энергосистемой решающее влияние имеют конкретные условия работы энергосистемы и конкретные задачи, решение которых возлагается на СПИНЭ, и связанное с этим место установки СПИНЭ в энергосистеме.

Для определения возможностей СПИНЭ как устройства, обеспечивающего повышение динамической

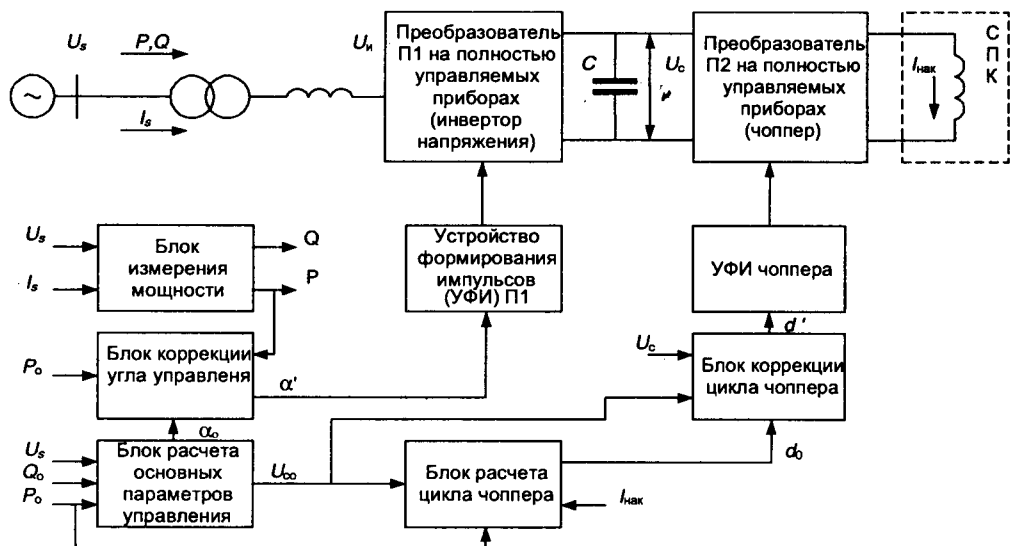


Рис.4. Блок-схема модели СПИНЭ с системой регулирования мощности

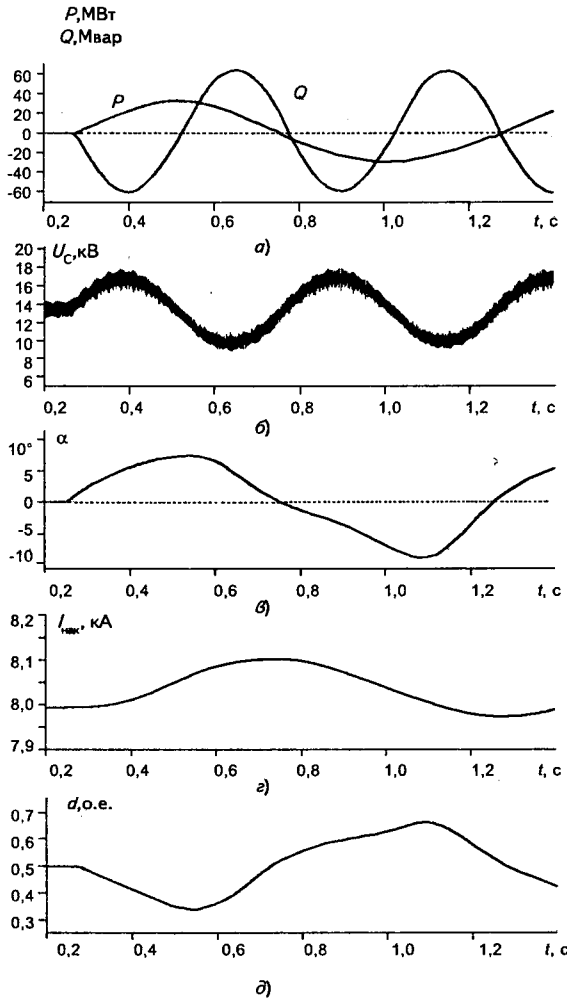


Рис.5. Расчетные осциллограммы процессов в схеме СПИНЭ:

а — P и Q ; б — U_c ; в — α ; г — $I_{\text{нак}}$; д — d .

устойчивости работы генераторов электростанций при больших возмущениях в электроэнергетической системе, связанных с КЗ на ЛЭП и работой АПВ, была разработана трехфазная цифровая модель, блок схема которой приведена на рис.6.

Расчетная модель включает турбогенератор мощностью 150 МВ·А, который через трансформатор мощностью 160 МВ·А и двухцепную линию 220 кВ соединен с системой бесконечной мощности, а так же СПИНЭ номинальной мощностью 80 МВ·А. На одной цепи линии происходит трехфазное КЗ продолжительностью 0,12 с с последующим отключением и АПВ (длительность времени АПВ — 1 с). Принято, что в течение расчетного времени вращающий момент на валу и напряжение возбуждения турбогенератора сохраняются неизменными. На рис. 7 показаны расчетные осциллограммы процессов в исследуемой системе, демонстрирующие нарушение динамической устойчивости при отсутствии СПИНЭ (рис.7,а,б) и сохранение устойчивости системы при наличии СПИНЭ (рис.7,в,г,д).

На осциллограммах положительные значения активной и реактивной мощностей соответствуют выдаче турбогенератором мощности в систему, а отрицательные — потреблению, а для СПИНЭ — наоборот, т.е. так же, как и на осциллограммах рис.5.

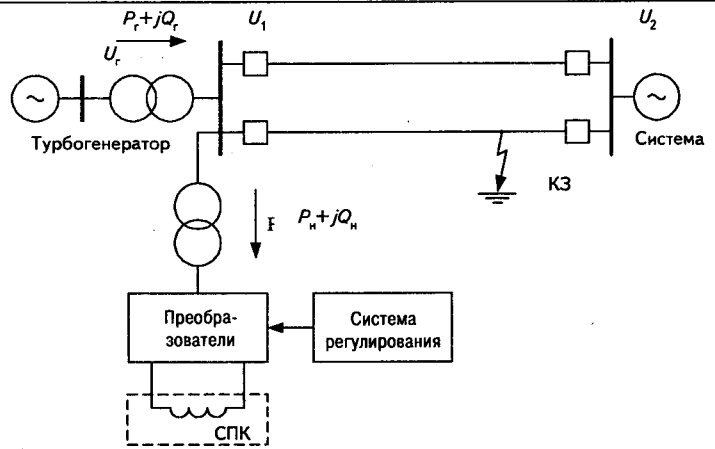


Рис.6. Расчетная схема электропередачи для исследования динамической устойчивости

На период аварии СПИНЭ принимает на себя часть активной мощности турбогенератора, стремясь поддержать активную мощность генератора на уровне до-

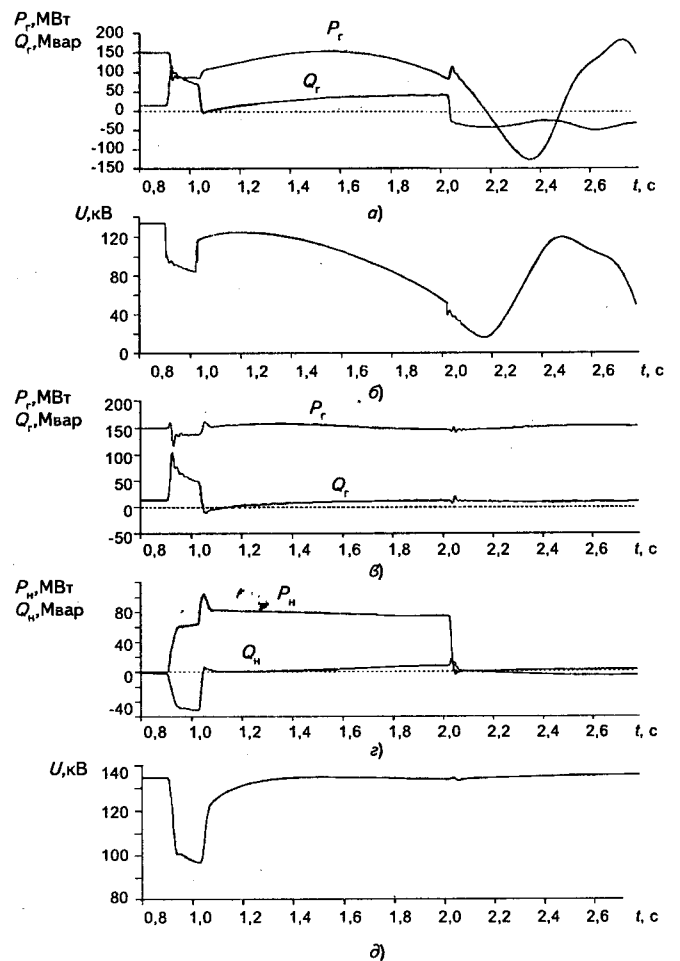


Рис.7. Расчетные осциллограммы процессов при КЗ на ЛЭП при отсутствии (а, б) и при наличии (в-д) СПИНЭ:

P_r , Q_r , P_n , Q_n — активная и реактивная мощность генератора и СПИНЭ соответственно; U — действующее значение напряжения на шинах (U_1)

аварийного значения мощности, что препятствует росту частоты вращения его ротора и, тем самым, обеспечивает динамическую устойчивость системы. Одновременно, за счет выдачи реактивной мощности в период КЗ, СПИНЭ уменьшает глубину провала напряжения в точке своего подключения, подтверждая положительный регулирующий эффект по напряжению и аналогичность действия в этом случае действию синхронной машины, что хорошо видно при сравнении осциллограмм изменения реактивной мощности на рис. 7, а, в и г.

Проведенные исследования показывают высокое быстродействие СПИНЭ с преобразователем на основе инвертора напряжения и высокую коммутационную устойчивость преобразователя в переходных режимах, связанных с КЗ в ЭЭС, доказывают эффективность применения рассматриваемого устройства в энергосистеме.

Список литературы

1. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах. М.: Высшая школа, 1989.
2. Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Матвейкин В.М. Выбор параметров индуктивного накопителя для энергетической системы // Электричество. 1992. № 6. С. 18—24.

3. Якимец И.В., Астахов Ю.Н., Лабунцов В.А. и др. Сверхпроводниковые накопители для энергетических систем // Электричество. 1995. № 9. С. 2—7.
4. Hassan I.D., Bucci R.M., Swe K.T. 400 MW SMES Power Conditioning System Development and Simulation // IEEE Transactions on Power Electronics. 1993. Vol. 8, № 3. P. 237—248.
5. Banerjee S., Chatterjee J.K., Tripathy S.C. Application of Magnetic Energy Storage Unit As Load-Frequency Stabilizer // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1990. Vol. 5, № 1. P. 46—51.
6. Lasseter R.N., Jalali S.G. Power Conditioning System for Superconductive Magnetic Energy Storage // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1991. Vol. 6, № 3. P. 381—387.
7. Skiles J.J., Kustom L.R. Performance of a Power Conversion System for Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) // IEEE Transactions on Power Systems. 1996. Vol. 11, № 4. P. 1718—1723.
8. Tripathy S.C., Juengst K.P. Sampled Data Automatic Generation Control with Superconducting Magnetic Energy Storage in Power Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1997. Vol. 12, № 2. P. 187—192.
9. Толстов Ю.Г., Скороваров В.Е., Бако В.Н., Топельберг В.В. Инвертор напряжения, работающий на противо-э.д.с. // Электричество. 1972. № 12. С. 37—40.
10. Антонов Б.М., Кувшинов А.А., Курносков Б.Д. и др. Характеристики и конструкции вентильных преобразователей для сверхпроводящих накопителей энергии // Электричество. 1995. № 8. С. 23—31.

Система непрерывного контроля и диагностики силового и вспомогательного оборудования подстанции "Выборгская"

ЛЕБЕДЕВА Н.В., ЛУКИН И.Н., МОРДКОВИЧ А.Г., НЕСВИЖСКИЙ А.М., ЦФАСМАН Г.М.

Описаны структура и состав локальных сетей системы непрерывного контроля и диагностики силового и вспомогательного оборудования подстанции "Выборгская". Проанализирован опыт внедрения первой очереди системы.

Преобразовательная подстанция (вставка постоянного тока) "Выборгская" является основным элементом электропередачи 330/400 кВ Россия — Финляндия. Подстанция, введенная в эксплуатацию в начале 80-х, содержит в настоящее время четыре комплекта высоковольтных преобразовательных устройств (КВПУ) мощностью 355 МВт каждое и является одной из самых мощных преобразовательных подстанций в мире. К её надежности предъявляются высокие требования. Мировой опыт показывает, что современное развитие микроэлектронной техники делает экономически оправданным для повышения надежности и готовности электроэнергетического оборудования применение системы непрерывного мониторинга его состояния. Вставка постоянного тока (ВПТ) "Выборгская" является основным элементом электропередачи 330/400 кВ РФ — Финляндия.

В настоящее время проводится полная модернизация АСУ ТП подстанции. В процессе модернизации в АСУ ТП интегрируется система непрерывного контроля и диагностики состояния силового и вспомогательного оборудования (КДСО). По количеству и номенклатуре контролируемых объектов, территориальной распределенности и сложности топологии КДСО подстанция "Выборгская" является уникальным для отечественной энергетики проектом. Достаточно ска-

зать, что общий объем сигналов (аналоговых и дискретных), формируемых КДСО, превышает 20000. При этом надежное функционирование КДСО осложнено высоким уровнем помех, генерируемых высоковольтными преобразовательными устройствами подстанции и другим силовым оборудованием, а также значительным числом (до 170) "интеллектуальных" абонентов локальной сети, собирающих и передающих диагностическую информацию."

В настоящей статье, обобщающей многолетний опыт авторов в области разработки и внедрения технических и программных средств КДСО [1], описаны структура и состав локальных сетей системы КДСО ВПТ "Выборгская", перечень решаемых задач, состав и структура технических и программных средств контроллеров сбора диагностической информации и первичных "интеллектуальных" датчиков, местных средств отображения информации.

Состав контролируемого оборудования. В системе КДСО преобразовательной подстанции "Выборгская" предусмотрены сбор диагностической информации о состоянии и параметрах следующих видов оборудования:

— синхронных компенсаторов реактивной мощности (СК) на стороне выпрямителя (СК1, СК2, по 100 МВ·А) и на стороне инвертора (СК3, СК4, по 160 МВ·А); для каждого из СК контролируются токи

и напряжения статора, температуры активных частей (меди и стали), температуры сегментов подшипниковых узлов (всего до 48 точек контроля температуры), уровень вибраций на подшипниковых щитах (в трех осях); для контроля состояния подшипников используется также датчик положения ротора, позволяющий в процессе останова ротора СК по специально разработанным алгоритмам оценивать коэффициенты сухого и вязкого трения в подшипниках, а также информировать персонал об ожидаемом времени останова [2]; обеспечивается также прием и обработка до 50 контактных сигналов защит и автоматики СК;

— электролизерной установки, обеспечивающей выработку водорода для охлаждения СК; на электролизерной установке контролируются токи и напряжения двух выпрямительных установок и резервного мотор-генератора, напряжения питающих вводов и фидеров питания автоматики, токи котлов, давления в магистралях и ресиверах водорода и азота, чистота водорода и кислорода, перепад давления между кислородом и водородом, температуры и концентрации водорода в двух помещениях, сигналы срабатывания защит;

— преобразовательных трансформаторов и сглаживающих реакторов для каждого из четырех КВПУ; для трехфазной группы преобразовательных трансформаторов с РПН на стороне 330 кВ типа ОДЦТП-135000/330/110 (ТВ1—ТВ4) контролируются давления и температуры масла в 15 высоковольтных вводах и номера ответвлений РПН в трех баках каждого из трансформаторов; для трехфазной группы преобразовательных трансформаторов на стороне 400 кВ типа ОДЦТП-135000/400/110 (ТИ1—ТИ4) — давления и температуры масла в 18 вводах, для реакторов типа РОДЦ2100/01/110 (РВ1—РВ4 и РИ1—РИ4) — давления и температуры масла во вводах (по 2 ввода на каждый реактор); предполагается на втором этапе работы ввести в зону контроля температуры верхних слоев масла в каждом из 32 баков контролируемого оборудования и состояние рабочих групп систем охлаждения;

— высоковольтных тиристорных вентилях (ВТВ); для ВТВ определяется число отказавших тиристорных ячеек (по 384 ячейки на один преобразовательный мост), блоков управления, состояние лазерных каналов передачи импульсов управления, контролируется число срабатываний разрядников, состояние защит;

— систем охлаждения преобразовательных мостов каждого КВПУ; контролируются температуры охлаждающей воды в каждом ВТВ и демпфирующих резисторах, эффективность работы насосов, электропроводность деионизованной воды и другие технологические параметры.

Предполагается на следующих этапах работ дополнить КДСО техническими и программными средствами контроля конденсаторных батарей фильтров на шинах 330 и 400 кВ и на сторонах 38 кВ выпрямителя и инвертора всех КВПУ, а также компрессорных установок, вырабатывающих сжатый воздух для воздушных выключателей ОРУ 330, 400 и 110 кВ.

Структура и состав КДСО ВПТ "Выборгская". КДСО ВПТ "Выборгская" реализована в виде локальной трехуровневой сети, включающей три подсети промышленных контроллеров сбора диагностической информации, каждая из которых связана со своим шлюзовым компьютером. В свою очередь три шлюзовых компьютера вместе с сервером КДСО образуют локаль-

ную подсеть непрерывного контроля и диагностики верхнего уровня. Логическая структура КДСО приведена на рисунке.

Отметим, что сервер КДСО обеспечивает сбор данных от устройств нижнего уровня, их обработку, документирование, архивирование и, при необходимости, детальное отображение на своем мониторе. Программные средства КДСО позволяют оператору конфигурировать состав аппаратуры нижнего уровня и ее параметры. Таким образом, сеть КДСО может функционировать независимо от АСУ ТП, обеспечивая возможность её автономной отладки и поэтапное развитие.

При интеграции системы в ИАСУ ТП сервер КДСО служит шлюзовой машиной АСУ ТП подстанции.

Реализованная структура КДСО позволяет расширять количество уровней иерархии. При этом контроллеры второго уровня могут выполнять роль серверов подсети нижнего уровня, объединяющей ряд "интеллектуальных" датчиков, и т.д.

В соответствии с рисунком КДСО подстанции включает в себя подсистемы КДСО комплектных высоковольтных преобразовательных устройств (КВПУ) 1 и 2, КДСО КВПУ3 и 4, КДСО общеподстанционного оборудования.

Подсистемы КДСО КВПУ1 и КВПУ2 (КВПУ3 и КВПУ4) реализованы в виде локальных двухуровневых сетей и включают в себя подсистемы непрерывного контроля и диагностики следующего оборудования:

- трансформаторов ТВ1, ТВ2, ТИ1, ТИ2 (ТВ3, ТВ4, ТИ3, ТИ4);
- реакторов РВ1, РВ2, РИ1, РИ2 (РВ3, РВ4, РИ3, РИ4);
- высоковольтных тиристорных вентилях (ВТВ) КВПУ1, 2 (КВПУ3, 4);
- системы охлаждения преобразовательных мостов КВПУ1, 2 (КВПУ3, 4).

Подсистема КДСО общеподстанционного оборудования реализована в виде локальной двухуровневой сети и включает в себя (на первом этапе) подсистемы непрерывного контроля и диагностики следующего оборудования:

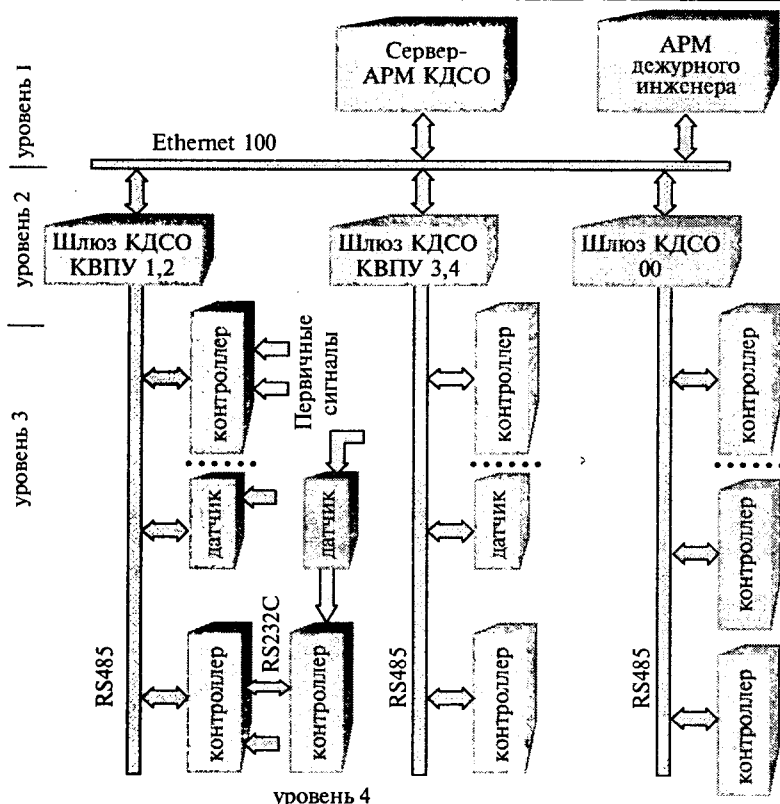
- синхронных компенсаторов СК1, СК2, СК3, СК4;
- электролизной установки.

Программные и технические средства КДСО КВПУ1 и КВПУ2, КВПУ3 и КВПУ4, КДСО общеподстанционного оборудования позволяют включать в состав локальных сетей новые подсистемы.

Технические средства КДСО. Все контроллеры сбора информации трех подсетей КДСО оригинальные, разработки ВЭИ. Для контроля СК и электролизерной установки используются типовые шкафы типа ПКДО магистрально-модульной структуры, ядром которой служит процессорный модуль МКУ4 с процессором Intel 80188 40 МГц.

Все модули УСО выполнены с оптоэлектронной гальванической развязкой [3]. В подсистемах контроля КВПУ применяются локальные контроллеры с этим же модулем либо его аналоги специализированной конструкции с расширенными функциями местного отображения диагностической информации.

Для контроля вводов трансформаторов используются оригинальные микропроцессорные датчики, совмещающие функции измерения давления и температуры в одном приборе [4].



Логическая структура КДСО подстанции "Выборгская"

Информация о положении ответвлений трансформаторов вводится в КДСО от сельсинных датчиков положения с помощью специально разработанного преобразователя ПСС-МК [5].

Для удобства обслуживающего персонала в комплекте с контроллерами сбора диагностической информации поставляются ручные дисплейные пульты местного отображения с четырехстрочным алфавитно-цифровым ЖК-дисплеем и специализированной клавиатурой.

Все три подсистемы реализованы в виде локальных сетей с физическим интерфейсом, выполненном в стандарте RS485. Предусмотрено гальваническое разделение электрических цепей каналов связи и промышленных контроллеров с уровнем изоляции 3 кВ. Протяженность канала связи от самого удаленного абонента локальной сети (электролизерной установки) до шлюзовой ПЭВМ составила 1200 м.

В сети верхнего уровня в качестве шлюзовых машин и сервера КДСО используются стандартные ПЭВМ, технические и программные средства поддержки Ethernet 100 с оптоволоконным каналом связи, преобразователи интерфейсов RS232C/RS485 типа I7520.

Программные средства. Программное обеспечение сервера КДСО работает под управлением операционной системы Windows NT 4.0 и реализовано средствами SCADA-системы WinCC фирмы "Siemens", принятой в качестве стандартной для построения верхнего уровня ИАСУ ТП Выборгской подстанции.

При интеграции КДСО в ИАСУ ТП использована технология OPC (OLE for Process Control). С этой целью для всех шлюзовых машин созданы программы OPC-серверов, обеспечивающих обмен данными с

абонентами третьего уровня (по стандартизованному протоколу DIAGNET-N) и подготовку данных в форматах WinCC. Подобный механизм интеграции позволяет использовать программное обеспечение КДСО совместно с любой современной SCADA-системой, принятой для верхнего уровня АСУ ТП объекта.

Программное обеспечение аппаратуры нижнего уровня, написанное на языке C++, включает в себя стандартные системные программы (диспетчер реального времени, обслуживание каналов связи, драйверы работы с модулями УСО и т.п.) и технологические программы, индивидуальные для каждого типа контролируемого оборудования.

В комплект поставки КДСО вошел пакет сервисных программ, в том числе программ для тестирования и метрологической проверки модулей УСО, интерактивной отладки и настройки и записи программ в долговременную память контроллеров КДСО.

В течение 2000—2001 гг. КДСО Выборгской подстанции внедрена частично в промышленную, частично в опытную эксплуатацию в рассмотренном объеме. Опыт, накопленный в процессе внедрения и опытно-промышленной эксплуатации КДСО, позволяет сделать следующие основные выводы:

- разработанные структура, технические и программные средства обеспечивают надежную и устойчивую работу большой системы КДСО в сложных условиях протяженной подстанции;
- успешная интеграция КДСО в АСУ ТП энергообъекта возможна при параллельном проектировании АСУ и КДСО или при заключении детальных соглашений между разработчиками по всем аспектам распределения "прав и обязанностей" в рамках единого проекта;
- использование персоналом подстанции средств КДСО позволило обеспечить большую наблюдаемость сложного оборудования подстанции и, как следствие, повысить качество эксплуатации.

Список литературы

1. Мордкович А.Г., Несвижский А.М., Фадеева Н.Э., Цфасман Г.М. Система диагностики трансформаторного оборудования//Труды ВЭИ. Высоковольтная и преобразовательная техника. Системы управления электротехническим и энергетическим оборудованием. 1996. С.115—119.
2. Цфасман Г.М. К выбору алгоритма контроля процесса останова ротора вращающейся машины в системах непрерывного контроля и диагностики её состояния//Труды ВЭИ, 2001.
3. Цфасман Г.М. Нормирующие преобразователи с гальванической изоляцией для систем сбора данных// Электротехника. 1996. №9.
4. Серебряков А.З., Лебедева Н.В., Дронов В.И., Тарасов А.А. Микропроцессорный датчик давления и температуры для компьютеризированных сетей диагностики//Электротехника. 1996. №9.
5. Цфасман Г.М., Валуйских А.О., Самусенко А.А. Устройство ввода в АСУТП информации от сельсинного датчика углового положения//Труды ВЭИ, 2001.

Опыт внедрения вычислительных средств нового поколения в устройствах управления мощностью турбоагрегата типа ЭЧСР-М

МЕЛЬНИКОВ В.С., МОРДКОВИЧ А.Г., СЕРЕБРЯКОВ А.Э., ТАРАСОВ А.А.,
ЧУГУННИКОВ Ю.В., УСАЧЕВ В.В.

Описан отечественный всережимный регулятор турбины для энергоблоков ЛМЗ, построенный на разработанном специализированном промышленном контроллере и новой системе модулей ввода/вывода, с расширенным набором функций управления и сервиса.

Предложен, испытан и внедрен вариант частичной модернизации устройств ЭЧСР-М, находящихся в эксплуатации, путем замены отработавших микроЭВМ В7 на описанный контроллер с расширенными функциями и с сохранением УСО, внутреннего монтажа и внешних кабельных связей.

Необходимость модернизации электротехнического оборудования в электроэнергетике, моральный и физический износ которого часто превышает допустимые с точки зрения безопасной эксплуатации пределы, является важнейшей задачей, стоящей перед отечественной наукой и промышленностью.

Как известно, разработка и внедрение первых цифровых систем автоматического управления на базе микропроцессорной техники для энергетических объектов, была начата в нашей стране около 1980 г. В частности, в ВЭИ им. В.И.Ленина была разработана серия различных устройств управления для электростанций и энергосистем на основе микроЭВМ отечественного производства — микросредств управляющей вычислительной техники МС УВТ В7.

Для задач управления мощностью и частотой вращения паровых турбин Ленинградского металлургического завода (ЛМЗ) в ВЭИ было разработано устройство ЭЧСР-М¹ (электрическая часть системы регулирования — микропроцессорная), которое выполняло функции всережимного регулятора турбины и взаимодействовало с устройствами АРЧМ и противоаварийной автоматики электростанции.

Устройство ЭЧСР-М вошло в состав штатных систем регулирования паровых турбин ЛМЗ мощностью 300, 500 и 800 МВт и до настоящего времени эксплуатируется на отечественных и зарубежных электростанциях.

Многолетний опыт эксплуатации подтвердил достаточную надежность технических средств и правильность алгоритмических решений.

Вместе с тем за прошедшие двадцать лет используемые в ЭЧСР-М электронные средства морально устарели и сняты с производства. Особенно сложная ситуация возникла с микроЭВМ, производство которой прекращено, в том числе не выпускается и ЗИП к ней.

Развитие и совершенствование микроэлектроники создало предпосылки создания устройств автоматического управления нового поколения. В ВЭИ разработано современное устройство управления для паровых и газовых турбин и парогазовых энергетических установок. Это устройство выполняет в полном объеме все функции ЭЧСР-М:

- защита паровой турбины от разгона при сбросах нагрузки;
- компенсация инерционности промышленного перегрева;
- защита паровой турбины от недопустимого понижения давления перед турбиной;
- регулирование частоты вращения для турбин, на которых отсутствует механический регулятор скорости;
- автоматическое регулирование мощности с коррекцией по частоте сети и по отклонению давления свежего пара — положению регулирующих клапанов; закон регулирования соответствует типовой схеме АРЧМ электростанции;
- противоаварийное управление мощностью турбоагрегата — импульсная разгрузка и послеаварийное ограничение мощности;
- автоматическое управление мощностью в режимах технологических внутривалочных ограничений;
- разворот и нагружение турбины в режиме автоматического пуска;
- контроль термонапряженного состояния турбины;
- техническая диагностика состояния гидравлической части системы регулирования турбины.

Устройство может работать как в нерезервированном режиме, так и в комплекте с аналогичными устройствами, реализуя дублированный (троированный) комплекс.

Применение современных программно-технических средств позволяет реализовать не только указанные технологические задачи, но и улучшить взаимодействие с оператором и устройствами более высокого иерархического уровня.

Основными особенностями нового устройства являются:

- существенное расширение сервисных функций, в том числе реализуемых при помощи инженерного пульта в виде типового IBM-компьютера, оснащенного специальным программным обеспечением, дополнительного малогабаритного ручного дисплейного пульта, обеспечивающих возможность в режиме "on line" изменять параметры регулятора (выдержки времени, коэффициенты передачи, уставки срабатывания защит, корректировка законов управления);
- возможность интеграции в АСУ ТП объекта, выполненную на любой современной SCADA-системе, принятой для верхнего уровня.

Стоимость разработанного регулятора существенно ниже любых современных аналогов, предлагаемых на отечественном рынке.

Малев В.В., Фрагин М.С., Мельников В.С. и др. Развитие электрогидравлических систем регулирования паровых турбин ЛМЗ на основе микропроцессорной техники // Теплоэнергетика. 1985. № 7. С. 12—16.

Вместе с тем, для систем управления типа ЭЧСР-М, находящихся в промышленной эксплуатации, разработка нового устройства создала предпосылки для ещё большего сокращения расходов и ускорения работ, реализованные при модернизации ЭЧСР-М турбоагрегатов 800 МВт Березовской ГРЭС-1.

Специалистами ВЭИ и Березовской ГРЭС-1 было принято решение использовать только вычислительное ядро нового регулятора (ВУ-ЭЧСР), полностью заменяющее в составе ЭЧСР-М две микросистемы МС УВТ В7 вместе с их блоками питания, при сохранении, что особенно важно, существующей аппаратуры сопряжения с объектом (УСО), внутришкафного монтажа, металлоконструкций и кабельных связей. Модернизация систем управления позволяет продлить их срок службы и существенно расширить функциональные возможности при затратах, на порядок меньших, чем при внедрении новых устройств.

ВУ-ЭЧСР представляет собой дублированную микропроцессорную вычислительную подсистему, реализованную на базе микропроцессорного управляющего контроллера МКУ4 с процессором Intel 80188. Контроллер МКУ4 и модули ввода/вывода выполнены преимущественно с использованием быстродействующих серий КМОП микросхем средней и большой степени интеграции, что позволило:

- упростить разработку, модификацию, отладку и перезапись программного обеспечения (без извлечения модулей и УФ-стирания);
- существенно снизить (более чем в 8 раз) мощность, потребляемую аппаратурой;
- заметно уменьшить габаритные размеры и массу устройств, особенно блоков питания;
- облегчить тепловые режимы аппаратуры;
- увеличить располагаемые объемы программной и оперативной памяти;
- существенно повысить производительность вычислительного устройства.

В результате улучшен интерфейс микросистемы с обслуживающим персоналом, обеспечена возможность интеграции ЭЧСР в состав АСУТП энергоблока и/или станции в целом, повышена надежность ЭЧСР.

Основные технические характеристики ВУ-ЭЧСР

Применяемый процессор.....	TN80C188EB
Тактовая частота процессора, МГц.....	40
Периодичность опроса входных сигналов, мс.....	10
Периодичность формирования управляющих воздействий, мс.....	10
Объём электрически программируемого ПЗУ, Кбайт.....	512
Объём статического ОЗУ, Кбайт.....	256
Потребляемая мощность, не более, Вт.....	40
Диапазон рабочих температур, °С.....	0...+70

Состав ВУ-ЭЧСР

В кассете устройства расположены два одинаковых набора модулей, образующих законченный комплект управляющего вычислительного устройства, объединенные двумя печатными платами межмодульных магистралей.

В каждый из комплектов входят:

- модуль контроллера управления МКУ4;
- модуль дискретного ввода/вывода МДВВ;

- модуль аналогового ввода/вывода МАВВ;
- блок вторичного электропитания БВП5.

Вне кассеты размещается переносной ручной дисплейный пульт с алфавитно-цифровым ЖК-индикатором (4×16 символов) и упрощенной клавиатурой. С помощью стандартного кабеля (для подключения VGA-мониторов) пульт подключается к любому из двух контроллеров МКУ4.

Работа устройства

Поскольку ВУ-ЭЧСР заменяет только вычислительное ядро ЭЧСР-М, все рабочие режимы и алгоритмы, включая алгоритмы резервирования, остаются теми же, что и в исходной структуре ЭЧСР-М. Эти "старые" алгоритмы реализует программное обеспечение ВУ-ЭЧСР, полностью переписанное на языках высокого уровня Си и Си++.

Новыми по отношению к исходному варианту ЭЧСР-М являются сервисные функции:

1. Формирование и хранение в энергонезависимой памяти информации о истории работы ЭЧСР-М и турбоагрегата в целом, неисправностях ЭЧСР-М (журналы событий и неисправностей).

2. Осциллографирование набора дискретных и аналоговых сигналов при возникновении заданных аварийных ситуаций (периодичность регистрации 10 мс, продолжительность 20 с, из них 10 с до аварии).

3. Широкий набор функций, реализуемый при помощи инженерного пульта в диалоговом режиме:

- параметризация ЭЧСР, включающая в себя выбор состава алгоритмов управления, задание уставок, выдержек времени, коэффициентов каналов регулирования с записью всех настроечных параметров в энергонезависимую память;
- мониторинг в реальном времени внешних и внутренних переменных;
- просмотр, архивирование, печать журнала событий и журнала неисправностей;
- просмотр, анализ, архивирование, печать зарегистрированных осциллограмм.

4. Наличие ручного дисплейного пульта с четырехстрочным алфавитно-цифровым ЖК-индикатором и упрощенной клавиатурой, отображающего текущую информацию о режиме работы и параметрах сигнала с помощью.

5. Высокоуровневая отладка программного обеспечения в среде Borland-C. Для этого к ВУ-ЭЧСР подключается ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

6. Отладка программного обеспечения и аппаратуры на детальном уровне выполняется с помощью встроенной в МКУ4 программы "монитор". Эта функция реализуется с помощью ПЭВМ, снабженной программой расширенной эмуляции терминала (возможно использование дисплейного терминала).

Для интеграции в АСУ ТП программное обеспечение ЭЧСР-М дополняется разработанными в ВЭИ типовыми модулями обработки и обмена по стандартизованному протоколу DIAGNET-N со шлюзовым компьютером, использующим технологию OPC (OLE for Process Control) и обеспечивающим подготовку данных в форматах АСУ ТП. Подобный механизм интеграции позволяет использовать программное обеспечение ЭЧСР-М совместно с любой современной SCADA-системой, применяемой для программирования и эксплуатации верхнего уровня АСУ ТП объекта.

Внедрение

Работы по внедрению модернизированного ВУ-ЭЧСР на обоих пылеугольных блоках К-800 Березовской ГРЭС-1 проводились в первой половине 2000 г.

Вычислительные устройства с комплектом кабелей сопряжения были установлены в шкафах №1 устройства ЭЧСР-М на месте демонтированных МС УВТ В7, при этом не потребовалось какое-либо изменение монтажа цепей внутри шкафа.

В процессе внедрения был проведен комплекс испытаний, позволивший установить полную преемственность алгоритмов управления в нормальных и аварийных режимах, надежность функционирования аппаратуры, достоверность мониторинга и осциллографирования процесса регулирования и переходных процессов.

Испытания на блоках №№ 1 и 2 включали проверку действия следующих каналов управления:

1. Канал релейной форсировки.
2. Канал предварительной (противоразгонной) защиты.
3. Канал дифференциатора (воздействия, пропорционального производной частоты).
4. Канал аварийной импульсной разгрузки.
5. Канал быстрого действующего ограничения мощности.
6. Канал регулирования давления пара перед турбиной ("регулятор до себя").

7. Канал разворота турбины при пуске до синхронной скорости.

После успешного завершения испытаний на двух блоках модернизированные устройства ЭЧСР-М были введены в промышленную эксплуатацию.

Выводы

1. При удовлетворительном состоянии устройств внешнего сопряжения и внутришкафного монтажа можно рекомендовать модернизацию ЭЧСР-М путем замены вычислительного ядра (ВУ-ЭЧСР).

2. Работы по модернизации ЭЧСР-М в данном варианте производятся в течение 10—15 рабочих дней.

3. Последующая замена устройств внешнего сопряжения может быть выполнена с использованием модернизированного ранее ВУ-ЭЧСР, сохранением клеммников, внешних кабельных связей, наружных металлоконструкций шкафов.

4. Наиболее предпочтительной является полная замена отработавших устройств ЭЧСР-М описанными регуляторами нового поколения.

5. Авторы считают, что успешный опыт модернизации устройств ЭЧСР-М путем замены только микроЭВМ В7, может представлять интерес для специалистов электростанций, эксплуатирующих аналогичные системы управления.

Комплект преобразователей напряжения для установок кондиционирования воздуха в отечественных пассажирских вагонах

КУЗЬКИН В.И., МЕЛЕШКИН В.Н., МЯСИЦЕВ С.В., УЛЬЯНОВ Е.К.

Разработан комплект частотно-регулируемых преобразователей для питания установок кондиционирования воздуха в отечественных пассажирских вагонах. Описаны структура комплекта и принцип действия его функциональных узлов. Рассмотрены особенности конструктивного исполнения комплекта. Изложен опыт успешной эксплуатации более 200 комплектов преобразователей на вагонах с кондиционерами.

В 1994 г. в России начались работы по созданию первого отечественного комплекса жизнеобеспечения пассажирского вагона (модель 61-4179) с системой кондиционирования воздуха. Научно-инженерный центр (НИЦ) "ЭЛСИЭЛ" ВЭИ принял участие в этих работах, взяв на себя разработку и освоение серийного производства частотно-регулируемого преобразователя для питания установки кондиционирования воздуха (УКВ). В мае 1996 г. в Твери состоялось заседание МВК по комплексу жизнеобеспечения вагона, где преобразователь для кондиционера (сокращённо ПТК) был представлен опытным образцом и сопутствующей технической документацией.

Последующая модернизация ПТК связана с переходом на более совершенные силовые ключи (типа IGBT) и с размещением его в подвагонных унифицированных модулях (ПУМ). Летом 1997 г. был изготовлен и испытан первый опытный образец ПТК-2, а зимой и летом 1997—1998 гг. вагон, оборудованный комплексом жизнеобеспечения (включая ПТК-2), прошёл так называемые пробные испытания по раз-

личным регионам России. В 1999 г. совместными усилиями НИЦ "ЭЛСИЭЛ" и НПП "ЭКСПРЕСС" (г. Тверь) освоено серийное производство ПТК-2: эти изделия установлены на 30 пассажирских вагонах тверского вагоностроительного завода (ТВЗ) и находятся в эксплуатации на южном и восточном направлениях железных дорог Российской Федерации. В 2000 г. изготовлено и поставлено в Тверь ещё около 200 комплектов ПТК-2.

Структурная схема ПТК изображена на рис.1, откуда видно, что он представляет собой комплекс полупроводниковых преобразователей, состоящий из двух функциональных блоков: один из них (блок повышения напряжения) превращает постоянное напряжение 110 В в стабилизированное постоянное напряжение 550 В, а другой (блок инверторов) преобразует это напряжение в три системы трёхфазных напряжений 380 В. Таким образом, реализуются три канала для питания приводных асинхронных двигателей УКВ — турбокомпрессора (15 кВт, 400 Гц), вентилятора конденсатора (2,8 кВт, 50 Гц) и приточного вентиля-

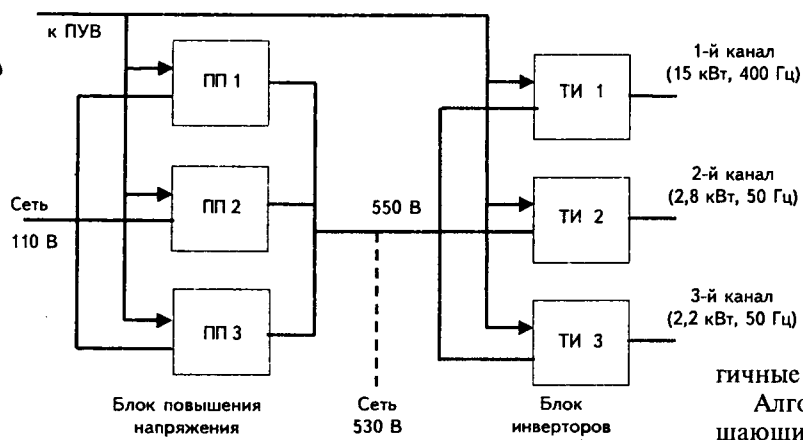


Рис.1. Структурная схема ПТК

тора (2,2 кВт, 50 Гц). При этом управление ПТК и регулирование режимов его работы осуществляется автоматически или вручную (проводником вагона) — посредством пульта управления вагона (ПУВ).

Входное напряжение 110 В обеспечивает система электроснабжения вагона, в состав которой входят трёхфазный генератор (с приводом от колёсной пары), мостовой трёхфазный выпрямитель и буферная аккумуляторная батарея. Для питания блока инверторов может быть также использовано и повышенное постоянное напряжение 520—540 В, получаемое, например, от высоковольтного преобразователя (при централизованном электропитании вагона) или от промышленной трёхфазной сети (через выпрямитель — на стоянке).

Блок повышения постоянного напряжения реализован на трёх одноктных обратных преобразователях ПП1—ПП3, соединённых параллельно по входу и по выходу. Электрическая схема одного такого преобразователя изображена на рис.2. Как видно, он содержит накопительный дроссель $L1$, транзистор $T1$ и диод $V1$, а также входной $C1$ и выходной $C2$ конденсаторы. При включении транзистора энергия от источника поступает в дроссель, а после его отключения через диод передаётся конденсатору $C2$. При этом конденсатор $C1$ в сочетании с индуктивностью входных цепей образует LC -фильтр нижних частот, препятствующий проникновению высокочастотных гармоник тока в источник энергии. Отметим также, что транзистор и диод конструктивно выполнены в одном модуле типа SKM 200 GAL 123 D (фирма "Semikron"), корпус которого изолирован от его силовых (и управляющих) выводов.

Управление преобразователями ПП1—ПП3 осуществляется от одной системы управления, выполнен-

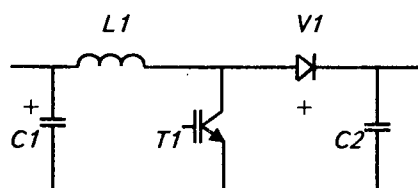


Рис.2. Электрическая схема одноктного обратного преобразователя

ной на базе микропроцессора типа TP87C51 (фирма "Intel"). При этом управляющие сигналы поступают на затворы транзисторов через так называемые драйверы, предназначенные для усиления и согласования уровней напряжения, гальванической развязки, защиты транзисторов от коротких замыканий и пр. Заметим, что в первых партиях ПТК повышающие преобразователи были укомплектованы драйверами типа SKHI 10 (фирма "Semikron"), а в последующем на замену им в НИЦ "ЭЛСИЭЛ" разработаны и освоены в производстве аналогичные драйверы ДТИ-1/12.

Алгоритм управления силовыми ключами в повышающих преобразователях таков, что частота коммутации каждого из них неизменна и равна 5 кГц, но управляющие сигналы сдвинуты во времени один относительно другого на одну треть периода, что обеспечивает существенное уменьшение пульсаций входного и выходного токов относительно их средних значений. Ширина управляющих импульсов зависит от сигнала обратной связи по выходному напряжению, реализуемого датчиком напряжения типа LV 25-P (фирма LEM) причём включение силового транзистора осуществляется при нулевом токе, а выключение — при ограничении максимально допустимого уровня тока в дросселях, контролируемого посредством датчиков тока типа LT 300-S/SP2 (фирма "ТвелеМ").

Иллюстрацией изложенного могут служить временные диаграммы тока в накопительных дросселях ПП1—ПП3, приведенные на рис.3 (осциллограммы получены с использованием цифрового осциллографа типа TDS 420A фирмы "Tektronix"). Как видно, для рассматриваемого режима работы повышающих преобразователей характерны три временных интервала, составляющих в совокупности период (200 мкс) коммутации силовых ключей. На первом из этих интервалов (продолжительностью 80 мкс) энергия запасается в дросселе, при этом ток возрастает от 0 до 200 А, на втором интервале (30 мкс) она передаётся выходному конденсатору, а ток уменьшается до нуля, третий же интервал (30 мкс) соответствует бестоковой паузе. В результате среднее за период коммутации значение тока в дросселе оказывается равным 55 А, а постоянная составляющая входного тока — 165 А, что при входном напряжении 140 В соответствует мощности порядка 23 кВт.

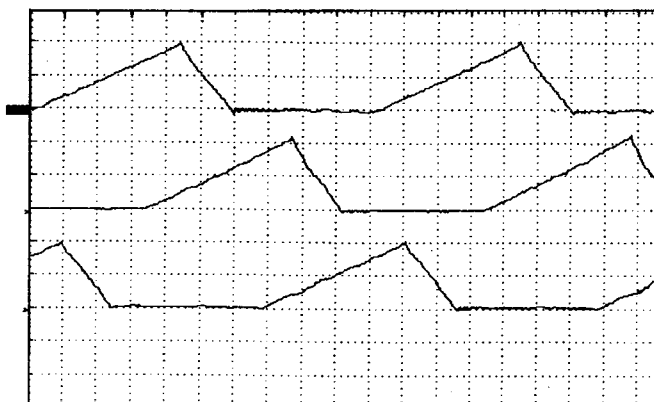


Рис.3. Временные диаграммы тока в дросселях ПП1—ПП3 (масштабы: 100 А/кл. и 20 мкс/кл.)

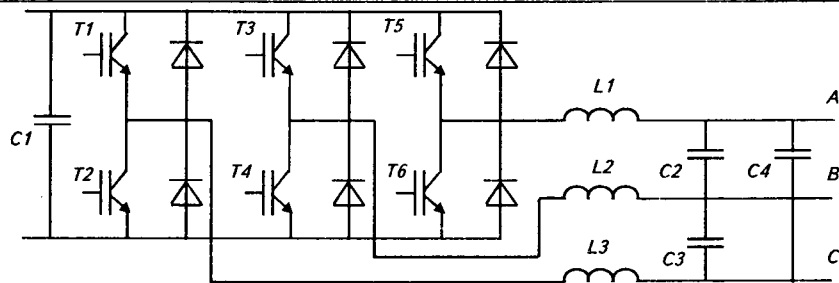


Рис.4. Электрическая схема трёхфазного инвертора 1-го канала

Трёхфазные инверторы *ТИ1–ТИ3* (см. рис.1) всех трёх каналов ПТК выполнены единообразно в виде мостового инвертора напряжения. Инвертор 1-го канала (*ТИ1*), электрическая схема которого приведена на рис.4, содержит три силовых IGBT-модуля (*T1–T6*) полумостового типа (SKM 150 GB 123 D) с трёхфазным LC-фильтром (*L1–L3, C2–C4*) на выходе. Этот фильтр обеспечивает сглаживание коммутационных пульсаций выходного напряжения инвертора на уровне, приемлемом для высокооборотного (24000 об/мин) турбокомпрессора.

Коммутация силовых ключей в инверторе *ТИ1* обеспечивается системой управления, выполненной на базе микропроцессора типа ADMC331 (фирма "ANALOG DEVICES"), в сочетании с драйверами типа SKH1 23, заменёнными в последующих партиях ПТК аналогичными драйверами ДТИ-2/12 (разработка НИЦ "ЭЛСИЭЛ"). Система управления формирует управляющие ШИМ-сигналы на частоте порядка 10 кГц, реализуя один из так называемых экономичных алгоритмов (максимальная амплитуда основной гармоники линейного напряжения на выходе инвертора соответствует его входному напряжению). Кроме того, система управления инвертором *ТИ1* осуществляет все необходимые функции режимной автоматики, защиты и сигнализации, представляя собой функционально законченный узел.

Для ограничения выходной мощности этого инвертора используется обратная связь по входному току, а контроль токов на выходе инвертора осуществляется посредством линейных датчиков тока типа LT 100-P/SP42. В качестве примера на рис.5 приведены временные диаграммы линейного напряжения (u_{AB} — сверху) и тока (i_B — внизу) на выходе *ТИ1* (после LC-фильтра). Как видно, осциллограммы получены на частоте 309 Гц, при этом амплитуда линейного напря-

жения равна 400 В, что подтверждает избранную пропорциональную зависимость между выходными частотой и амплитудой напряжения (частота регулируется в диапазоне 1:50).

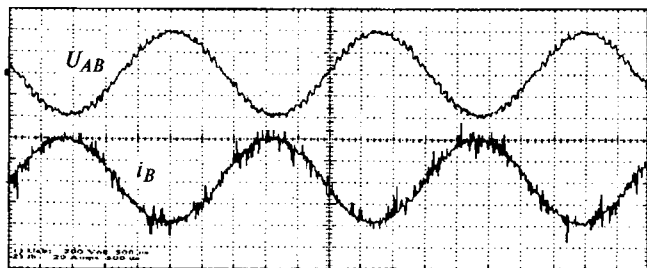
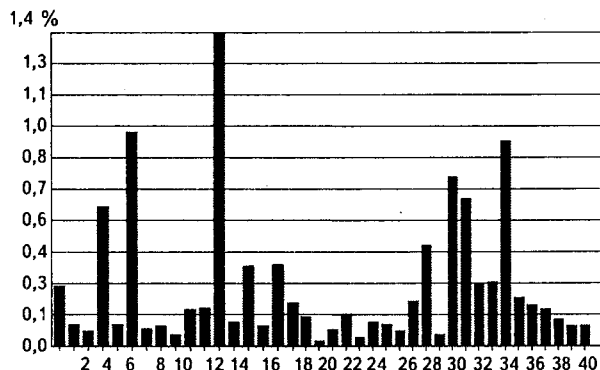
Привлекает внимание и тот факт, что изображённые на рис.5 кривые напряжения и тока находятся практически в противофазе. Это означает, что в статорных обмотках турбокомпрессора фазовый сдвиг между напряжением и током равен примерно $\pi/6$, т.е. его коэффициент мощно-

сти в этом режиме принимает вполне ожидаемое значение 0,87. Учтём наконец, что амплитуда линейного тока (судя по осциллограмме) равна 40 А и, следовательно, выходная мощность *ТИ1* составляет около 12 кВт.

Изображённые на рис.5 осциллограммы качественно подтверждают эффективное подавление высших гармоник напряжения и тока на выходе инвертора *ТИ1*. Количественной оценкой этого факта может служить частотный спектр линейного напряжения u_{AB} , приведенный на рис.6. Как видно, наибольшая из высших гармоник (№13) составляет 1,4% основной гармоники (309 Гц), при этом коэффициент гармоник напряжения равен всего лишь 2,53%. Частотный спектр линейного тока i_B имеет аналогичный характер: наибольшая из высших гармоник (№7) составляет 1,7% основной гармоники, а коэффициент гармоник тока равен 4%.

Трёхфазные инверторы *ТИ2* и *ТИ3* имеют аналогичную структуру, но выполнены на шестиключевых IGBT-модулях мостового типа (SKM 40 GD 124D) и с использованием соответствующих драйверов типа SKH1 60, которые в последующем заменены аналогичными драйверами ДТИ-6/12, и токовых датчиков типа LA 25-NP. Ещё одна особенность рассматриваемых инверторов состоит в том, что они не содержат выходных LC-фильтров, так как вентиляторные двигатели промышленной частоты менее критичны, в сравнении с высокооборотным турбокомпрессором, к спектральному составу выходного ШИМ-напряжения.

Подтверждением этому может служить временная диаграмма одного из линейных токов на выходе *ТИ2*, приведенная на рис.7. Как видно, осциллограмма получена на частоте 50 Гц, при этом ток имеет практически синусоидальную форму, а его амплитуда равна примерно 7 А. Количественной характеристикой си-

Рис.5. Временные диаграммы линейного напряжения (u_{AB}) и линейного тока (i_B) на выходе *ТИ1* (масштабы: 200 В/кл., 20 А/кл. и 500 мкс/кл.)Рис.6. Частотный спектр линейного напряжения u_{AB} на выходе *ТИ1*

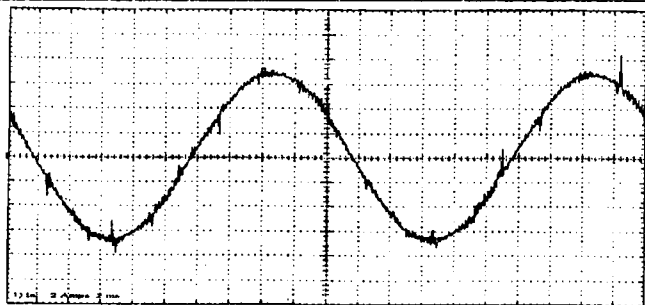


Рис.7. Временная диаграмма линейного тока на выходе ТИ2 (масштабы: 2 А/кл. и 2 мс/кл.)

нусаидальности тока служат следующие два показателя: наибольшая из высших гармоник (№ 12) составляет всего лишь 0,8% основной гармоники, а коэффициент гармоник тока равен 2%. Для оценки выходной мощности ТИ2 принимаем коэффициент мощности двигателя равным 0,9, а амплитуду линейного напряжения — 520 В, в итоге получаем 2,7 кВт.

В трёхфазных инверторах всех трёх каналов реализована двойная защита от опасных последствий внутренних и внешних КЗ, для чего наряду с токовыми датчиками используются и защитные свойства упомянутых драйверов. Эффективность такой защиты подтверждается временной диаграммой линейных токов при КЗ между фазами А и В на выходе инвертора ТИ2, приведенной на рис.8. Как видно, линейные токи за 3,5 мкс увеличиваются до 75 А, после чего происходит отключение силовых модулей инвертора.

Конструктивно ПТК выполнен в двух ПУМ (высота 600 мм, длина 1042 мм и глубина 1146 мм), каждый из которых посредством направляющих устанавливается в соответствующем каркасе, закреплённом на раме вагона и закрытом спереди обтекателем. Конструкция ПУМ предусматривает принудительный внешний обдув теплоотводящих элементов (оребрённые радиаторы на стенках модуля), который осуществляется под контролем систем управления — с использованием цифровых термодатчиков типа DS 1820 (фирма "DALLAS SEMICONDUCTOR"), установленных на радиаторах.

На верхних стенках подвагонных модулей установлены поворачивающиеся крышки, обеспечивающие одностороннее обслуживание ПТК, в частности, свободный доступ к его элементам и возможность замены неисправных узлов без демонтажа исправных элементов и узлов.

Силовые транзисторы размещены в ПУМ на упо-

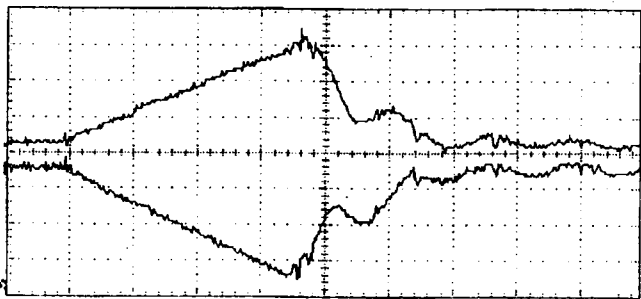


Рис.8. Временная диаграмма линейных токов при коротком замыкании на выходе ТИ2 (масштабы: 25 А/кл., 1 мкс/кл.)

мянутых радиаторах. Дроссели повышающих преобразователей установлены в центральной части модуля, а накопительные конденсаторы рассредоточены по шинам высокого постоянного напряжения как на выходе повышающего преобразователя, так и на входах трёхфазных инверторов.

Равномерный тепловой режим в ПУМ обеспечивается встроенными вентиляторами, которые получают питание с выхода 2-го канала. Подогрев элементов в модулях ПТК при пониженных температурах окружающей среды (до -40°C) осуществляется автоматически посредством нагревателей, подключённых к входным шинам ПТК через силовой ключ.

Системы управления, защиты и сигнализации преобразователей в составе ПТК смонтированы на отдельных печатных платах, размещённых в непосредственной близости от драйверов силовых модулей. Все платы управления снабжены разъёмами и приспособлены для быстрой замены на исправные в случае отказов. Их конструкция обеспечивает возможность быстро определять место отказа с помощью встроенных средств диагностики и устранять его причину в стационарных условиях. В составе ПТК имеются также блоки защиты, обеспечивающие аварийное отключение входного автоматического выключателя на ПУВ.

Все каналы ПТК одновременно обеспечивают общий закон управления производительностью УКВ, осуществляя плавные пуск, регулирование и остановку его двигателей. Для ограничения пусковых токов и регулирования частоты вращения двигателей применяется взаимосвязанное изменение частоты и напряжения на всех выходах ПТК.

Чтобы продемонстрировать простоту управления комплексом ПТК-УКВ, рассмотрим кратко действия проводника вагона при ручном управлении. Предварительно он выбирает на ПУВ режим работы (кондиционирование) и вид управления (ручное), а затем включает вентиляцию вагона. При этом двигатель 3-го канала плавно разгоняется до номинальной частоты вращения, а через 20 с по окончании разгона на световом табло ПУВ высвечивается соответствующая индикация ("Вентиляторы вагона").

Затем проводник устанавливает переключатель "Холодильная установка" в положение 1, после чего двигатель 2-го канала плавно разгоняется до номинальной частоты вращения. Через 20 с по окончании разгона этого двигателя автоматически включается 1-й канал ПТК и турбокомпрессор в течение 100 с плавно разгоняется до частоты вращения 200 Гц, а на световом табло ПУВ высвечивается индикация "Холодильная установка". Регулирование производительности турбокомпрессора (изменением выходной частоты инвертора ТИ1 в пределах от 200 до 400 Гц) осуществляется специальным переключателем, а нормальная работа ПТК в целом подтверждается индикатором "Преобразователь кондиционера" на световом табло ПУВ.

Для остановки турбокомпрессора переключатель "Холодильная установка" необходимо перевести в исходное состояние. При этом двигатели 1- и 2-го каналов последовательно (и плавно) затормаживаются до полной остановки, а на ПУВ исчезает соответствующая световая индикация.

Опыт эксплуатации вагонов с кондиционированием воздуха в течение первых семи месяцев 2000 г. показал, что в так называемый период приработки на долю ПТК приходилось по разным оценкам от 5 до

15% общего количества отказов комплектующего оборудования вагонов. Проведенный анализ позволил выявить следующие причины отказов ПТК: скрытые дефекты комплектующих изделий (67% отказов), недоработки схемотехнического (13%) и технологического (15%) характера, а также нарушение условий эксплуатации (5%).

В перечне некачественных комплектующих элементов оказались, например, отдельные диоды, конденсаторы и резисторы. Схемотехнические ошибки проявились, в частности, случайными функциональными сбоями, обусловленными воздействием электромагнитных помех. Нарушения технологии производства сопровождались, к примеру, пробоем изоляции между обмотками маломощных трансформаторов или возникновением электрической дуги между контактами силовых разъёмов. Курьёзом на этом фоне выглядит факт эксплуатации ПУМ с неплотно закрытыми крышками.

Обобщение опыта эксплуатации ПТК привело к смене отдельных поставщиков комплектующих изделий и усилению контроля — входного и пооперационного — на стадии производства, а также к ужесточению режимов испытаний готовых узлов и ПТК в целом.

Устранение неисправностей в ПТК, выявляющихся в процессе эксплуатации, осуществляется в сервисных (Москва и г. Адлер) и ремонтном (г. Тверь) центрах. При этом отказавшие функциональные блоки и блоки управления определяются соответственно с помощью встроенных средств индикации и диагностики, а неисправные силовые узлы или отдельные элементы — по характерным признакам, свойственным их электрическому, механическому или тепловому разрушению. Почти годовой опыт ремонта отказавших изделий свидетельствует о том, что среднее

время восстановления работоспособного состояния ПТК не превышает 1 ч.

Выводы

1. Разработан комплект частотно-регулируемых преобразователей для питания установок кондиционирования воздуха в отечественных пассажирских вагонах.

2. Освоен серийный выпуск этих комплектов преобразователей и осуществляется регулярная поставка их на вагоностроительный завод (г. Тверь).

3. Накоплен опыт успешной эксплуатации отечественных пассажирских вагонов с кондиционированием воздуха (на южном и восточном направлениях железных дорог РФ), что позволяет говорить о целесообразности дальнейшего совершенствования выпускаемых преобразователей и расширения сфер их применения.

В частности, на очередном заседании МВК, которое состоялось в Твери в ноябре 2000 г., НИЦ "ЭЛСИЭЛ" представил модернизированные опытные образцы ПТК-2М (в подвагонном и внутривагонном исполнении), которые обеспечивают питание как установок кондиционирования воздуха, так и бытовых электроприборов в вагонах. Подобные преобразователи могут найти применение не только на новых пассажирских вагонах, но и на вагонах электропоездов. Ими также могут быть оснащены эксплуатируемые пассажирские вагоны (в ходе их капитального ремонта).

Более подробную информацию о деятельности НИЦ "ЭЛСИЭЛ" ВЭИ в области приводных преобразователей частоты можно получить по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, дом 12, телефон (факс): (095)361-94-61, e-mail: elsyel@vei.ru

Схемотехнические и конструктивные решения преобразователей частоты для регулируемого электропривода

ТАРАТУТА И.П., ЧУПРИКОВ В.С.

Рассмотрены основные схемотехнические решения преобразователей частоты для синхронных и асинхронных двигателей на напряжение 1 кВ и выше, принятые в разработках АО "Ансальдо-ВЭИ". Отмечены особенности конструкции преобразователей, вопросы управления и охлаждения силовых приборов.

Частотно-регулируемый электропривод является одним из современных средств повышения эффективности работы и увеличения сроков службы оборудования предприятий. Особенно большой эффект дает внедрение преобразователей частоты (ПЧ) для двигателей средней и большой мощности, установленных на насосных и компрессорных станциях предприятий и городских служб, нефте- и газоперекачивающих станций, в электроприводе мощных агрегатов типа шаровых мельниц и т.д. Только за счет экономии электроэнергии срок окупаемости ПЧ в ряде случаев не превышает одного года, а с учетом экономии средств на ремонт электродвигателей и трубопроводов — и того меньше. Постоянный рост стоимости

электроэнергии определяет растущую потребность в таких ПЧ.

Последние достижения в области силовой электротехники и электроники позволяют сегодня реализовать ПЧ, обладающие возможностями, не достижимыми ранее. Появление новых быстродействующих силовых приборов — биполярных транзисторов с изолированной базой (Insulated Gate Bipolar Transistor — IGBT) и полностью управляемых тиристоров (Integrated Gate-Commutated Thyristor — IGCT) [1], обеспечило широкое внедрение принципов ШИМ-управления в ПЧ для асинхронных двигателей. С учетом прогресса в области микроэлектроники (наличие широкого спектра мощных сигнальных процессоров и

Шины 6/10 кВ

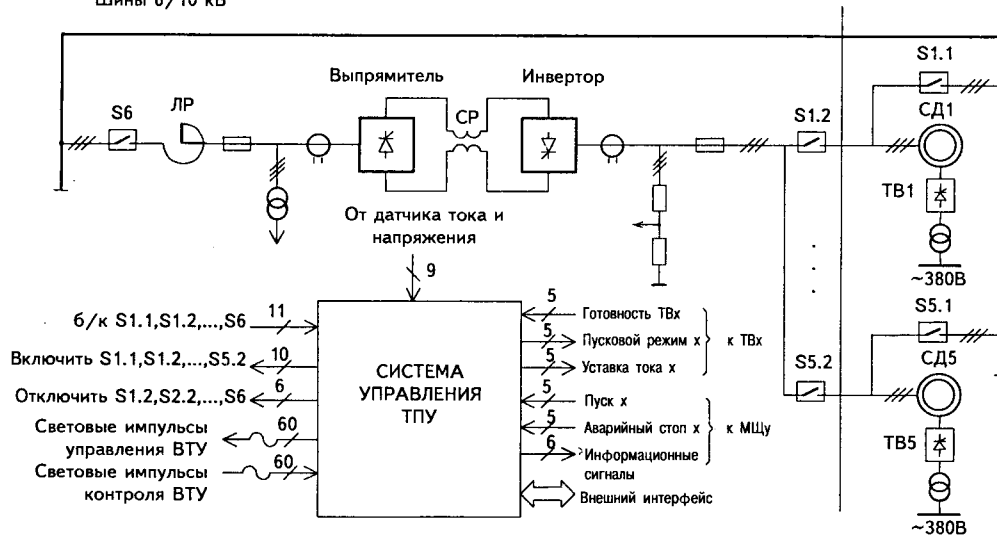


Рис.1. Схема тиристорного пускового устройства для пяти синхронных двигателей

ностью от 800 до 4000 кВт. Для плавного пуска таких СД оптимальным является тиристорное пусковое устройство (ТПУ), представляющее собой тиристорный преобразователь, реализованный по шестипульсовой схеме выпрямитель-инвертор со звеном постоянного тока. Схема ТПУ для пуска 5 СД, включающая все внешние и внутренние обменные сигналы, приведена на рис.1. Для ограничения токов КЗ на входе преобразователя устанавливаются линейные реакторы (ЛР), а в цепи постоянного тока — сглаживающий реактор (СР). Система управления ТПУ

программируемых логических матриц) это дает возможность создавать ПЧ с практически неограниченными функциональными возможностями.

Остановимся на рассмотрении основных схемотехнических решений преобразователей частоты для синхронных и асинхронных двигателей на напряжение выше 1 кВ, основываясь на опыте разработок АО "Ансальдо-ВЭИ".

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Пусковые и пускоостановочные устройства

Пусковые устройства наиболее эффективно применяются на объектах, имеющих несколько синхронных двигателей (СД), работающих в едином технологическом цикле, например, на компрессорных станциях промышленных предприятий, особенно там, где по условиям энергосистемы двигатели обычно включаются один раз в неделю и работают на полную мощность независимо от потребности в сжатом воздухе. Регулирование давления в системе выполняется с помощью задвижек. Пусковое устройство, выполняющее поочередный пуск всех СД компрессорной станции, позволяет по мере необходимости отключать и снова включать двигатели практически неограниченное число раз, обеспечивая тем самым экономию электроэнергии.

На компрессорных станциях обычно используются синхронные двигатели на напряжение 6 и 10 кВ мощ-

путем изменения углов зажигания тиристоры, регулирования тока штатных тиристорных возбудителей (ТВ) и коммутации выключателей обеспечивает:

- плавный поочередный пуск 5 нагруженных синхронных электродвигателей;
- синхронизацию с питающей сетью частоты вращения электродвигателей и последующее их переключение на питание от промышленной сети 6/10 кВ.

Тиристорные пускоостановочные устройства (ТПОУ) отличаются от ТПУ только тем, что они допускают реверсивный режим работы. При этом обеспечивается регулируемое торможение двигателя с рекуперацией энергии маховых масс в питающую сеть. Силовая схема ТПОУ такая же, как в ТПУ, различие только в системе управления преобразователя.

Тиристорные преобразователи частоты

В случаях, когда требуется непрерывное регулирование частоты вращения СД, применяются тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ). Возможны два схемных решения.

В первом случае, схема ТПЧ аналогична шестипульсовому ТПУ. Такие ТПЧ применяются для двигателей, допускающих загрузку обмоток статора высшими гармониками, т.е. для специальных вентильных двигателей либо для обычных двигателей, мощность которых может быть снижена на 20—25% от номинальной.

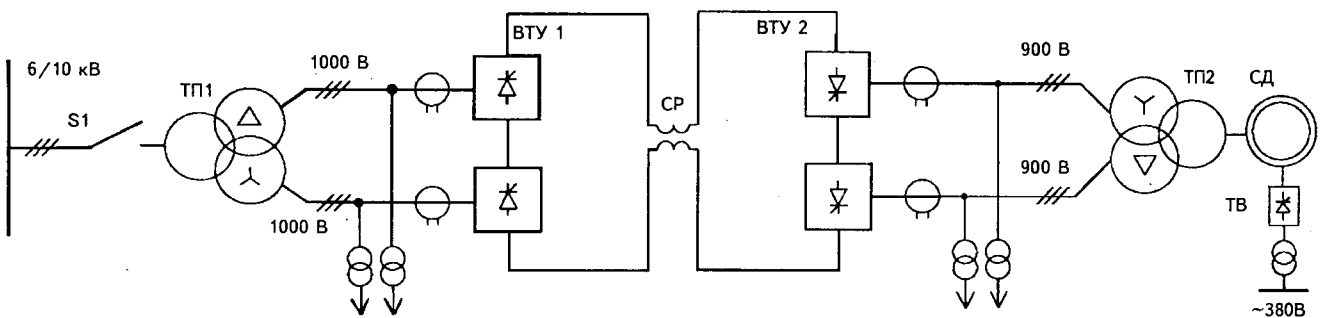


Рис.2. Схема 12-пульсного тиристорного преобразователя частоты для стандартного синхронного двигателя на напряжение 6/10 кВ

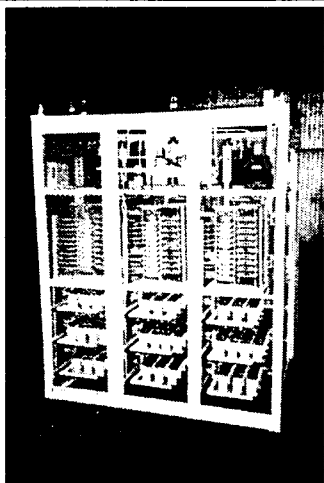


Рис.3. Высоковольтное тиристорное устройство ТПУ для двигателей мощностью 3150 кВт на напряжение 10 кВ

Во втором случае, когда обычный СД должен иметь возможность длительно работать с полной электрической нагрузкой, оптимальным решением является использование 12-пульсной схемы с трехобмоточными трансформаторами на входе и выходе преобразователя. Пример схемы такого ТПЧ приведен на рис.2.

В основу конструкции тиристорных ПЧ положен модульный принцип построения. Два (или четыре для 12-пульсного ТПЧ) преобразовательных моста, а также ограничители перенапряжения, предохранители, дроссели насыщения, измерительные датчики тока и напряжения и устройства системы светового управления размещаются в единой конструкции, называемой высоковольтным тиристорным устройством (ВТУ).

Каждый преобразовательный мост состоит из 6 тиристорных вентилях, содержащих один или несколько соединенных последовательно тиристоров, демпфирующие RC-цепочки и ячейки управления тиристоров. Число тиристоров в вентиле зависит от рабочего напряжения ПЧ. Для ТПЧ с трансформаторами на входе и выходе уровень переменного напряжения лежит в пределах 800 — 2200 В и выбирается исходя из параметров используемых тиристоров для оптимизации режима их работы.

Питание ячеек управления тиристоров осуществляется по кабельному каналу от специального высококачественного источника питания, связь ячеек управления тиристоров с системой управления ТПУ выполняется с помощью волоконно-оптических световодов, обеспечивающих гальваническую развязку сигналов и высокую помехоустойчивость каналов управ-

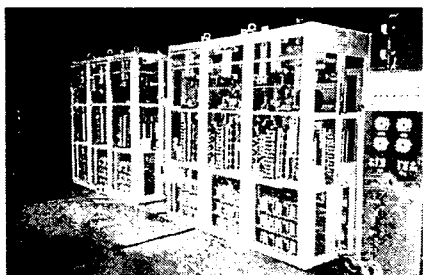


Рис. 4. Тиристорный преобразователь частоты с водяным охлаждением для двигателя мощностью 6300 кВт на напряжение 2 кВ

ления и контроля. Для повышения надежности ПЧ в ряде применений целесообразно применить дублирование каналов управления.

В зависимости от вида ПЧ используются три способа охлаждения тепловыделяющих элементов — тиристоров, резисторов демпфирующих цепей и дросселей насыщения: для ТПУ — естественное воздушное, для ТПЧ — в зависимости от требований заказчика принудительное воздушное или водяное. При принудительном воздушном охлаждении в качестве теплоотводов используются охладители на водяных трубах. При водяном охлаждении ПЧ используются комплекты системы охлаждения деионизированной водой с теплообменными агрегатами, выполненными, в зависимости от местных условий, по схеме "вода-вода" или "вода-воздух".

На рис.3. приведены ВТУ пускового устройства для двигателей мощностью 3150 кВт на напряжение 10 кВ, на рис.4 — два ВТУ преобразователя частоты для двигателя мощностью 6300 кВт на напряжение 2 кВ с системой водяного охлаждения.

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Для асинхронных двигателей принципиально невозможно использование в инверторах обычных тиристоров, так как статорная обмотка двигателя не генерирует ЭДС, необходимую для обеспечения их запирания. До последнего времени такие инверторы строились на запираемых тиристорах. Недостатком их использования были большие динамические потери и необходимость в громоздких цепях выключения тока.

С появлением мощных IGBT и позднее полностью управляемых тиристоров IGCT этот недостаток был ликвидирован и стало возможным реализовать инверторы напряжения по многоуровневым схемам с ШИМ-управлением с частотой модуляции 500—800 Гц. Наибольшее распространение в мире получила схема трехуровневого инвертора, называемая NPC (neutral point clamp) [2], позволяющая при использовании приборов класса напряжения 4,5 кВ реализовывать преобразователи на напряжение до 4,2 кВ без использования трансформаторов.

На рис.5 приведена схема ПЧ на базе трехфазного неуправляемого диодного выпрямителя с емкостным накопителем и автономного трехуровневого инвертора напряжения с широтно-импульсным управлением. Этот преобразователь разработан и изготовлен в АО "Ансальдо-ВЭИ" и предназначен для непрерывного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя на напряжение 3 кВ и мощность 1000 кВт.

ПЧ включает в себя линейный реактор, диодный выпрямитель, инвертор напряжения и выходной фильтр. Линейный реактор предназначен для ограничения тока КЗ и снижения уровня перенапряжений на выпрямителе. Повышающий трансформатор T с диодным выпрямителем во вторичной обмотке, подключенный к сети 220 В через магнитный пускатель MP и токоограничивающий резистор, обеспечивает плавный заряд емкостного накопителя $C1—C6$ до подачи высокого напряжения. Три фазы инвертора формируют на выходе преобразователя трехфазное напряжение с регулируемой частотой и амплитудой. Инвертор реализован на 12 IGCT-приборах $V1—V12$ по NPC схеме, обеспечивающей 3 уровня выходного напряжения в каждой фазе и, соответственно, 5 уровней линейного напряжения. Выходной LC-фильтр улучшает

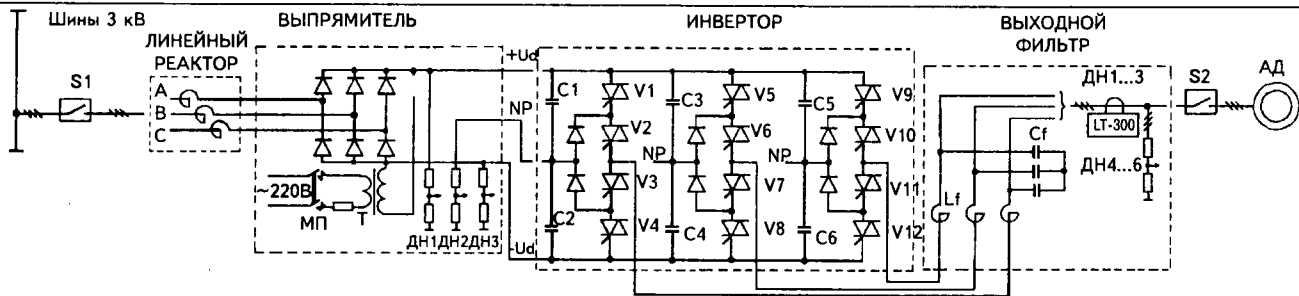


Рис.5. Схема преобразователя частоты для асинхронного двигателя напряжением 3 кВ

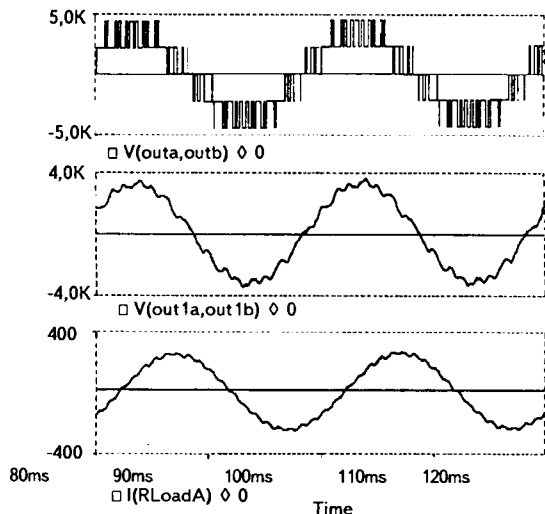


Рис.6. Временные диаграммы выходного линейного напряжения инвертора, напряжения и тока нагрузки

форму выходного напряжения ПЧ и снижает уровень du/dt на обмотках двигателя. На рис.6 приведены временные диаграммы работы инвертора.

Наибольший интерес представляет конструкция инвертора, реализованного в шкафном исполнении. Шкаф инвертора состоит из трех одинаковых секций, в каждой из которых смонтировано оборудование од-

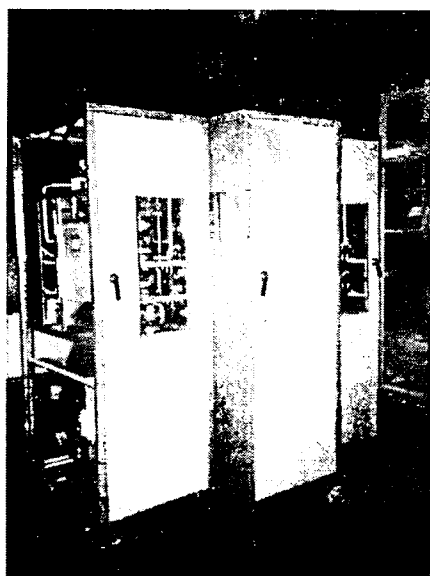


Рис.7. Шкаф инвертора

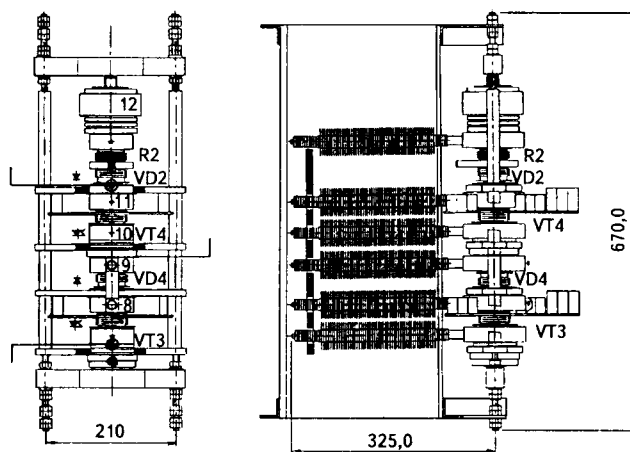


Рис.8. Зажимное устройство полуфазы NPC инвертора на IGBT

ной фазы. В средней секции расположена также система управления ПЧ. В нижней части каждой секции установлен вентилятор принудительного воздушного охлаждения, над которым располагается вентиляционный короб (рис.7).

К конструкции инвертора предъявляются особые требования в части обеспечения минимальной индуктивности силовых цепей. С этой целью шины постоянного напряжения выполнены в виде "сэндвича" с твердой изоляцией, проходящего через все три секции. Силовые элементы каждой фазы зажаты в два столба вместе с охладителями на водяных трубках, радиаторы которых фиксируются в изоляционном вентиляционном коробе. Конструкция зажимного столба показана на рис.8. В качестве резистора демпфирующей RLD цепочки используются низкоиндуктивные полупроводниковые резисторы типа РК143 прижимной конструкции (разработка ВЭИ), зажатые в том же столбе. Низкоиндуктивные накопительные и демпфирующие конденсаторы размещаются по обе стороны вентиляционного короба.

Список литературы

1. Ковалев Ф.И., Флоренцев С.Н. Анализ и прогноз развития приборов силовой электроники на рубеже столетий// Сборник докладов V симпозиума "Электротехника 2010 год". Т.2. М., 1999.
2. Zuckerberger A. и др. Design, simulation and realization of high power NPC converters equipped with IGBTs// IEE-IAS, St Louis, Oct.12-16, 1998.

Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электросила»

ЛОГИНОВ А.Г., ФАДЕЕВ А.В

Рассмотрены функции регулирования, управления и защиты, выполняемые микропроцессорным автоматическим регулятором возбуждения типа АРВ-М. Представлены данные по его конструктивному исполнению.

Работы по созданию микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения типа АРВ-М были начаты в 1997 г. Регулятор проектировался как многофункциональное устройство, удовлетворяющее современным требованиям и способное управлять системами возбуждения мощных турбо- и гидрогенераторов, изготавливаемых АО «Электросила».

Основным отличием АРВ-М от регуляторов возбуждения предыдущих поколений является расширенный набор выполняемых функций. Помимо традиционного назначения — регулирования возбуждения и ограничения режимных параметров генератора, АРВ-М осуществляет фазоимпульсное управление и защиту тиристорного преобразователя возбудителя от непроводимости вентилей и КЗ на стороне постоянного тока, управляет коммутационными аппаратами возбудителя при начальном возбуждении, поддерживает дружественный интерфейс с пользователем. Регулятор может использоваться в одноканальной и двухканальной системах возбуждения. В первом случае для повышения надежности используется горячее резервирование регуляторов, во втором — резервируются регуляторы и тиристорные преобразователи. Применение современного микроконтроллера, обладающего высокой производительностью и широким спектром периферийных устройств позволило резко упростить аппаратные средства регулятора, уменьшить его массу и габаритные размеры, повысить надежность. Цифровой способ обработки информации обеспечивает высокую стабильность статических и динамических характеристик регулятора, возможность их настройки в широких диапазонах без изменения параметров аппаратуры, реализацию сложных алгоритмов управления. Для обеспечения наладочных работ предусмотрены специальные режимы работы регулятора. АРВ-М поддерживает связь с оператором с помощью сенсорного дисплея, на который выводятся значения режимных параметров системы возбуждения, настройки регулятора, состояние его входных и выходных дискретных сигналов, дневник событий и другая информация, необходимая при наладке и эксплуатации системы возбуждения.

Разработано несколько модификаций регулятора. Это — регулятор для бесщеточной системы возбуждения, ручной регулятор тока возбуждения РТВ-М, используемый в качестве резервного для зарубежных поставок, регулятор напряжения вспомогательного генератора для независимых систем возбуждения, регулятор резервного тиристорного возбудителя. Выбор модификации регулятора производится настройкой программного обеспечения. При этом аппаратные средства остаются практически неизменными.

АРВ-М успешно прошел испытания на электродинамической модели МЭИ и в 2000—2001 гг. введен в эксплуатацию на Мингечаурской ГЭС, Кузнецкой ТЭЦ, Нижнетагильской ТЭЦ, Ростовской АЭС.

Функции регулятора

Основные функции, выполняемые АРВ-М, иллюстрируются рис.1. Рассмотрим кратко алгоритмы их реализации.

Измерение режимных параметров генератора. Для формирования регулирующего воздействия измеряются следующие режимные параметры: U_g — напряжение генератора, F_g — частота напряжения генератора, U_{bar} — напряжение шин станции, I_g — ток генератора, P_g , Q_g — активная, реактивная мощность генератора, $\cos \varphi$ — косинус угла нагрузки, I_e — ток возбуждения, U_r , I_r — напряжение, ток ротора, U_{syn} — напряжение синхронизации тиристорного преобразователя.

Измерительные входы регулятора подключаются к стандартным трансформаторам напряжения генератора и сети, к трансформаторам тока генератора и тиристорного преобразователя, а также к напряжениям питания тиристорного преобразователя и напряжению ротора. Для гальванического разделения цепей, вместо традиционных промежуточных трансформаторов, используются измерительные преобразователи напряжения и тока использующие эффект Холла. Эти преобразователи отличаются малыми габаритными размерами, высокой точностью и быстродействием, способностью передавать сигналы как переменного, так и постоянного напряжения (тока).

Применение быстродействующего микроконтроллера позволило отказаться от использования в составе регулятора аналоговых датчиков режимных параметров. Выходные напряжения измерительных преобразователей, пропорциональные мгновенным значениям измеряемых токов и напряжений, поступают на быстродействующие 12-разрядные аналого-цифровые преобразователи. Дальнейшая обработка этих сигналов производится цифровыми методами, благодаря чему цифровые датчики АРВ-М отличаются высокой стабильностью, точностью и быстродействием при низком уровне пульсаций выходного сигнала. Обновление информации на выходах датчиков производится с периодом, равным 15° . Настройка датчиков выполняется программными средствами; цепи регулятора не содержат переменных резисторов.

Для измерения периода и частоты напряжения генератора используется таймер микроконтроллера с тактовой частотой 1,25 МГц. Коды таймера фиксируются в моменты перехода мгновенных напряжений генератора в область положительных значений. Обновление информации на выходе датчика частоты производится с периодом, равным 120° .

Температура обмотки ротора t_r вычисляется по значениям тока и напряжения ротора.

Быстродействующая система контроля датчиков позволяет выявить их неисправность. В частности, предусмотрен контроль цепей измерения напряжения генератора и напряжения синхронизации, фиксирую-

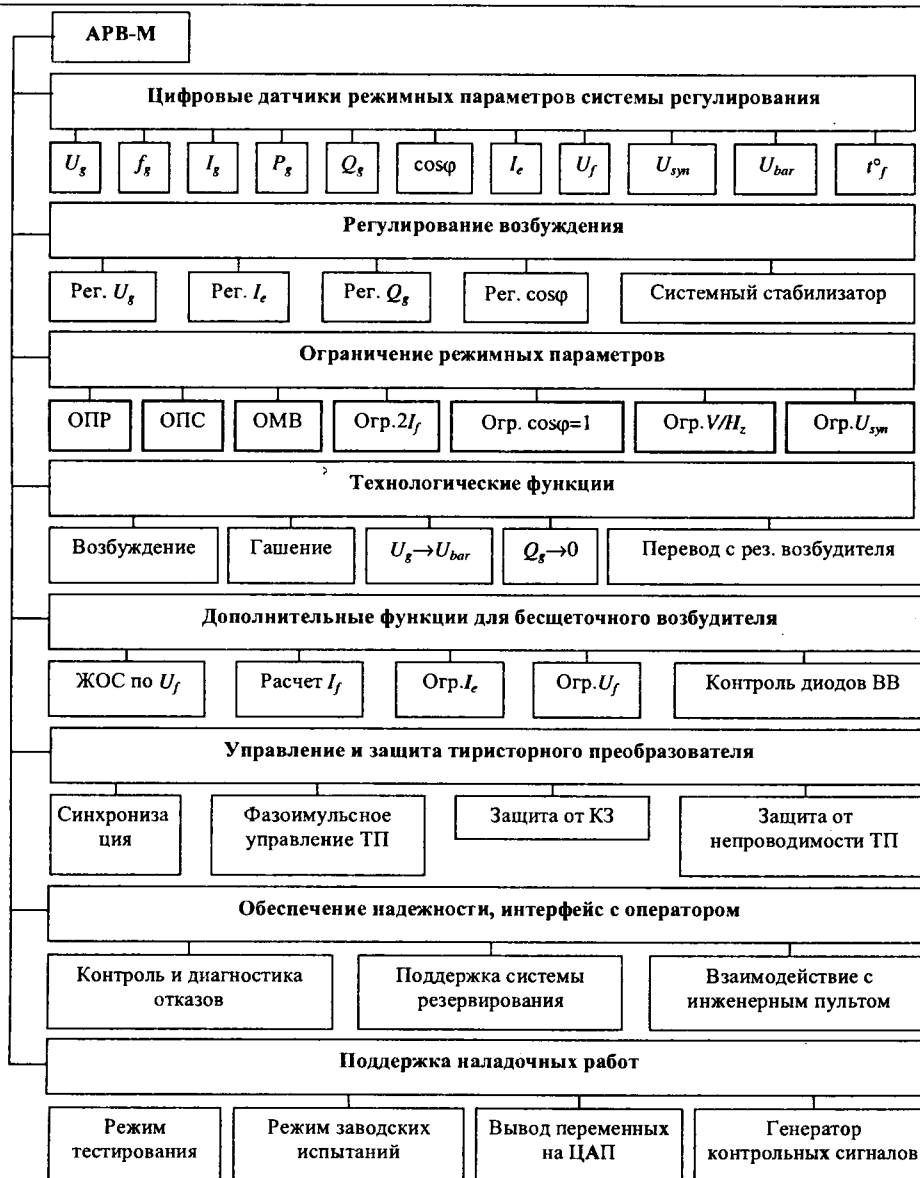


Рис.1. Функции АРВ-М

щий обрыв фазы, обратное чередование фаз, а также исчезновение напряжений.

Регулирование возбуждения. Основным режимом работы АРВ-М является регулирование напряжения на шинах станции с заданным статизмом по реактивному току генератора. Реализован ПИД-закон регулирования напряжения, обеспечивающий в статическом режиме поддержание напряжения в точке регулирования равным уставке. Автоматическое уменьшение коэффициента регулирования в диапазоне частот электромеханических колебаний способствует улучшению демпфирования качаний ротора. При работе генератора на холостом ходу регулирование напряжения производится по ПИ-закону.

Для повышения пределов статической и динамической устойчивости, улучшения демпфирования колебаний ротора применяется классический системный стабилизатор. Для формирования его выходного сигнала используется изменение и производная частоты напряжения генератора, производная тока ротора.

Кроме регулирования напряжения АРВ-М обеспе-

чивает регулирование реактивной мощности и $\cos\varphi$. Это — медленнодействующие режимные регуляторы, корректирующие уставку регулятора по напряжению.

При наладке АРВ-М и системы возбуждения, а также при возникновении частичных отказов, препятствующих работе регулятора в автоматическом режиме, предусматривается ручное регулирование тока возбуждения.

Благодаря использованию режима слежения, при котором уставка регулятора, работающего в режиме off-line, уравнивается с соответствующим режимным параметром, обеспечивается изменение режима регулирования без изменения режима генератора.

Ограничение режимных параметров генератора. Функции, образующие этот класс, — ограничение перегрузки по токам ротора и статора с выдержкой времени, зависящей от кратности перегрузки, ограничение минимального возбуждения, ограничение двукратного тока ротора, ограничение тока ротора на уровне, соответствующем $\cos\varphi = 1$ при номинальной активной мощности — традиционны для регуляторов

возбуждения сильного действия.

Характеристики ограничения перегрузки и минимального возбуждения аппроксимируются кусочно-линейными функциями. Отметим, что в отличие от аналоговых регуляторов здесь не возникает проблем с точным заданием выдержек времени в широком диапазоне.

АО «Электросила» задает три характеристики ограничения минимального возбуждения — при $U_g \leq 0,9$, при $U_g = 1$ и при $U_g \geq 1,1$. При расчете уставки ОМВ регулятор АРВ-М учитывает все эти характеристики.

Алгоритмы ограничения построены по единому принципу. При возникновении режима ограничения вместо канала регулирования по напряжению генератора в работу вступает канал ПИ-регулирования ограничиваемого параметра относительно уставки ограничителя. В установившемся режиме ограничиваемый параметр равен уставке. Вывод ограничителя из работы производится, когда выход канала напряжения начинает действовать в сторону, противоположную действию ограничителя. Это обеспечивает "мягкий" выход из режима ограничения.

При снижении частоты генератора регулятор, поддерживая напряжение равным уставке, будет увеличивать ток ротора генератора. При этом происходит увеличение индукции генератора и блочного трансформатора, приводящее, вследствие возрастания токов намагничивания, к перегреву указанного оборудования. Для предотвращения перегрева регулятор снижает уровень ограничения максимальной уставки по напряжению пропорционально уменьшению частоты генератора (V/Hz ограничение). После восстановления частоты уставка автоматически возвращается к исходному значению.

При ручном управлении регулятор поддерживает неизменным ток возбуждения, поэтому при увеличении частоты будет пропорционально возрастать напряжение генератора. В этом режиме регулирования может отсутствовать сигнал от измерительного трансформатора напряжения генератора, например в результате отключения автомата в этой цепи. В схеме самовозбуждения напряжение синхронизации пропорционально напряжению генератора. Поэтому ограничение напряжения генератора производится по косвенному параметру — напряжению синхронизации.

Технологические функции. Это функции, автоматизирующие процессы управления возбуждением по командам оператора или АСУ-ТП.

При начальном возбуждении АРВ-М управляет автоматом гашения поля, контактором шунтирования ротора, а в схеме самовозбуждения и контактором начального возбуждения, а также осуществляет плавное увеличение уставки регулятора (программный пуск). Начальное возбуждение предусмотрено как при автоматическом, так и при ручном регулировании. При автоматическом управлении подъем уставки прекращается, когда напряжение генератора станет равным напряжению сети. Предусмотрен контроль всех стадий процесса начального возбуждения.

Гашение поля генератора производится переводом тиристорного преобразователя в инверторный режим с максимальным углом управления и с последующим съемом импульсов управления.

Перед включением генератора в сеть предусмотрено подгонка напряжения генератора к напряжению сети. Перед отключением генератора от сети произво-

дится его разгрузка по реактивной мощности.

При работе генератора на резервном электромашином возбудителе АРВ-М переводится в специальный режим, позволяющий проверить управляемость тиристорного преобразователя и подготовить систему возбуждения к безударному переходу с резервного на основное возбуждение.

Дополнительные функции для бесщеточного возбудителя. При оснащении генератора бесщеточным возбудителем возникает необходимость выполнения регулятором ряда специфических функций.

Для увеличения быстродействия бесщеточной системы возбуждения вводится жесткая отрицательная обратная связь по напряжению ротора. Обеспечивается также ограничение максимального напряжения ротора и тока возбуждения возбудителя.

Бесщеточный возбудитель не содержит датчика тока ротора, поэтому предусматривается расчет этого тока по диаграмме Потье.

АРВ-М обеспечивает контроль проводимости диодов вращающегося выпрямителя путем обработки импульсных сигналов от датчиков токов ветвей, установленных на бесщеточном возбудителе (разработка программного обеспечения контроля диодов выполнена Л.Г.Егоровым, АО «Электросила»). При возникновении неисправности формируется диагностическая информация с указанием номера непроводящего диода (диодов). При выходе из строя определенного количества диодов производится ограничение максимального тока ротора.

Управление тиристорным преобразователем. Выходным сигналом регуляторов предыдущих поколений являлся аналоговый сигнал, поступающий на систему управления тиристорным преобразователем. Последняя формирует шесть импульсов управления тиристорами, фаза которых относительно питающего напряжения тиристорного преобразователя зависит от значения выходного сигнала регулятора. Использование высокопроизводительного микроконтроллера позволило включить в состав АРВ-М цифровую систему фазоимпульсного управления тиристорным преобразователем.

Синхронизация импульсов управления выполнена по принципу фазовой автоподстройки частоты и фазы цифрового опорного генератора к частоте и фазе напряжения питания тиристорного преобразователя. Угол управления отсчитывается относительно фазы опорного генератора. Опорный генератор выполнен на таймере и счетчике микроконтроллера. Таймер формирует импульсы с периодом $0,25^\circ$, поступающие на счетчик, отсчитывающий фазу опорного генератора. Изменение кода загрузки таймера приводит к изменению фазы и частоты опорного генератора.

В качестве измерительного органа используется фазовый детектор, на вход которого подаются линейные напряжения питания тиристорного преобразователя (напряжение синхронизации), измеренные аналого-цифровыми преобразователями контроллера, и текущая фаза генератора опорной частоты. Для сглаживания формы кривой напряжения синхронизации, искаженной коммутационными провалами, используется двойной RC-фильтр. Предусмотрена компенсация фазовой погрешности фильтра (примерно 41° при частоте 50 Гц) и частотного дрейфа его фазы (примерно $0,7^\circ/\text{Гц}$). Предусмотрено также введение с инженерного пульта смещения фазы опорного генератора,

позволяющее использовать трансформаторы с любой группой соединения обмоток.

Выход фазового детектора, пропорциональный синусу разности фаз опорного генератора и напряжения синхронизации, поступает на ПИ-регулятор, формирующий код загрузки таймера опорного генератора. В результате воздействия этого регулятора на мгновенную частоту опорного генератора выход фазового детектора устанавливается близким к нулю, что означает совпадение фаз напряжения питания ТП и генератора опорной частоты.

Программа синхронизации выполняется с периодом, равным 15° . Квант изменения угла регулирования составляет $0,25^\circ$. Максимально допустимый диапазон изменения частоты синхронизации при номинальной частоте 50 Гц составляет 30—95 Гц.

Зависимость выпрямленного напряжения тиристорного преобразователя от угла управления является косинусоидальной функцией. Для обеспечения линейной регулировочной характеристики системы возбуждения $U_f = f(Y_{АРВ})$ угол управления определяется как $\alpha = \arccos(Y_{АРВ})$. Полученный таким образом угол управления ограничивается диапазоном $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$. Для обеспечения требуемого угла запаса в инверторном режиме максимальный угол управления уменьшается при возрастании тока возбуждения.

Длительность импульсов управления тиристорами формируется в зависимости от тока возбуждения. При токе возбуждения, меньшем заданного значения, когда возможен режим прерывистого тока, длительность импульсов составляет 120° (точнее соответствует интервалу между моментами формирования импульсов для i -го и $i+2$ тиристора). Иначе формируются двоячные, с интервалом 60° , импульсы длительностью 0,7 — 0,9 мс, поступающие одновременно на i -й и $(i-1)$ -й тиристоры.

Защита тиристорного преобразователя. При КЗ на стороне постоянного тока тиристорного преобразователя (в частности, при замыкании на кольцах ротора) значительно увеличивается ток возбуждения и снижается выпрямленное напряжение. Защита срабатывает при одновременном выполнении двух условий: ток возбуждения превышает уставку по току и абсолютное значение напряжения возбуждения на интервале 60° не превышает уставку по напряжению. При срабатывании защиты снимаются импульсы управления тиристорным преобразователем. Затем, по истечении заданного времени, проверяется уровень напряжения возбуждения. Если напряжение восстановилось (дуга погасла), то деблокируются импульсы управления ТП и система возбуждения остается в работе. В противном случае фиксируется катастрофический отказ, а поскольку программа защиты выполняется одновременно и резервным регулятором, то эта ситуация приводит к отказу двух каналов и отключению АГП.

Потеря проводимости одного из вентиля тиристорного преобразователя может произойти в случае обрыва в цепи управляющих импульсов, а в однофазной системе возбуждения — в результате перегорания предохранителя при пробое тиристора. При этом в фазном токе ТП появляется постоянная составляющая, намагничивающая выпрямительный трансформатор, что приводит к его перегреву. Принцип действия защиты основан на анализе в течение периода амплитуд положительной и отрицательной полуволн фазных токов тиристорного преобразователя. Сраба-

тывание защиты квалифицируется как катастрофический отказ канала. Диагностическая информация о номере тиристора, потерявшего проводимость, выводится на инженерный пульт.

Обеспечение надежности системы возбуждения. Высокая надежность и живучесть системы возбуждения достигается за счет резервирования аппаратуры и контроля ее исправности. Сокращению времени восстановления способствует развитая система диагностики отказов.

В зависимости от номинальной мощности генератора и требований заказчика предусматривается одноканальная или двухканальная системы возбуждения. В одноканальной системе резервируются регуляторы возбуждения. Наиболее предпочтительным является использование двух одинаковых регуляторов АРВ-М. Вместе с тем, по требованию заказчика, возможно использование ручного регулятора тока возбуждения РТВ-М. Последний выполнен на тех же аппаратных средствах, что и АРВ-М, но отличается от него программным обеспечением. В двухканальной системе резервируются тиристорные преобразователи и регуляторы возбуждения.

В то время, когда основной регулятор управляет системой возбуждения, резервный регулятор находится в режиме слежения, при котором:

- импульсы управления ТП и выходные дискретные сигналы заблокированы;
- режим регулирования (поддержание напряжения, реактивной мощности, $\cos \phi$ или тока возбуждения) устанавливается таким же, как у основного регулятора;
- уставка отслеживает текущее состояние регулируемого параметра;
- смещение общего канала регулирования (рабочая точка) и, следовательно, угол управления тиристорным преобразователем устанавливаются такими же, как у основного регулятора; для передачи резервному регулятору режима регулирования и смещения используется интерфейс CAN, обеспечивающий двусторонний обмен информацией между основным и резервными регуляторами.

В результате обеспечиваются условия для безударного перехода на резервный регулятор (канал). Такой переход может происходить по команде оператора, либо автоматически, при отказе основного регулятора.

Программно-аппаратные средства АРВ-М обеспечивают непрерывный контроль состояния его аппаратуры и аппаратуры системы возбуждения. В зависимости от последствий, к которым приводят нарушения в работе аппаратуры, различаются:

- катастрофический отказ, при котором регулятор (канал) полностью теряет работоспособность; в этом случае производится безусловный перевод управления системой возбуждения на резервный регулятор (канал); примером катастрофического отказа может служить потеря напряжения синхронизации;
- частичный отказ, при котором регулятор может работать только в режиме ручного управления, например, при потере напряжения генератора; в этом случае перевод управления на резервный регулятор производится, если тот способен работать в режиме автоматического управления; использование режима ручного управления повышает живучесть системы возбуждения;
- условный отказ, при котором перевод на резервный канал производится, если он исправен (нет катастрофического, частичного или условного отказа);

- неисправность, при которой регулятор может утратить некоторые функции, но остается в работе; в качестве примера можно привести нарушение обмена информацией между регуляторами по интерфейсу CAN.

При возникновении нарушений на инженерный пульт системы возбуждения и пульт местного управления регулятора выводится соответствующая диагностическая информация, облегчающая поиск неисправного узла.

Интерфейс с оператором. Для интерфейса с оператором используются пульт местного управления регулятором и инженерный пульт управления системой возбуждения (разработка программного обеспечения инженерного пульта выполнена совместно с Р.П.Сойту, АО "Автоматика-Север").

Пульт местного управления регулятором содержит семисегментный индикатор, используемый для вывода диагностической информации, набор светодиодов — для отображения состояния регулятора и набор переключателей — для управления состоянием регулятора. Разъем RS-232 служит для подключения персонального компьютера. При наладке регулятора к гнездам ЦАП1-ЦАП4 и \perp , с которыми соединены выходы цифро-аналоговых преобразователей контроллера, может быть подключен осциллограф. С помощью инженерного пульта на входы этих преобразователей подаются различные переменные, вычисляемые при выполнении программы, что позволяет наблюдать их изменение в реальном времени.

В секции управления и регулирования установлен инженерный пульт управления — сенсорный дисплей, у которого экран совмещен с программируемой клавиатурой. На инженерный пульт выводится информация о режиме и состоянии системы регулирования возбуждения, настройке регулятора, дается расшифровка диагностической информации, выводимой на семисегментный индикатор пульта местного управления регулятора, ведется дневник событий. С помощью инженерного пульта в заданных пределах изменяются настройки регулятора.

Поддержка наладочных работ. Режим тестирования предусмотрен для обеспечения работ по проверке и настройке аппаратуры регулятора и системы возбуждения. В режиме тестирования регулятор выполняет:

- ввод дискретных сигналов и их отображение на инженерном пульте, что позволяет проверить прохождение сигналов от их источников до контроллера регулятора;

- измерение режимных параметров, что позволяет выполнить проверку и предварительную настройку цифровых датчиков регулятора;

- вывод дискретных сигналов; состояние этих сигналов задается с инженерного пульта; таким образом можно проверить прохождение сигналов от регулятора до их приемников;

- формирование импульсов управления тиристорами с углом управления, задаваемым с инженерного пульта; при отсутствии напряжения синхронизации период следования импульсов соответствует номинальной частоте, что обеспечивает возможность контроля их прохождения до тиристоров при снятом напряжении питания; при наличии напряжения синхронизации импульсы управления синхронизируются с этим напряжением, поэтому можно проверить управляемость тиристорного преобразователя, настроить смещение фазы генератора опорной частоты СИФУ.

Так называемый режим заводских испытаний используется при испытаниях системы возбуждения на заводе-изготовителе и, как показывает опыт, может быть полезен при вводе системы возбуждения в эксплуатацию, в частности при снятии характеристик КЗ и ХХ генератора. При работе регулятора в этом режиме предполагается, что питание тиристорного преобразователя производится от независимого источника, а тиристорный преобразователь может быть включен на обмотку возбуждения либо на эквивалентную нагрузку. В этом режиме регулятор переводится в режим регулирования тока возбуждения, главное отличие которого от штатного режима ручного управления заключается в использовании индивидуальных настроек, устанавливаемых в соответствии с условиями испытаний и параметрами испытательной установки. Другим отличием является то, что по команде "Возбуждение" уставка по току возбуждения устанавливается равной нулю и программное изменение уставки не производится.

Для снятия переходных и частотных характеристик системы регулирования возбуждения в состав регулятора входит программный генератор контрольных сигналов. На выходе генератора формируются следующие сигналы: импульс заданной длительности, амплитуды и полярности, гармонический сигнал с заданной амплитудой и частотой, пилообразный сигнал с заданной амплитудой и скоростью изменения.

Контрольный сигнал может быть введен в канал регулирования напряжения генератора, в канал регулирования тока возбуждения, в датчик частоты регулятора.

Конструкция

Аппаратура регулятора размещается в кассете фирмы RITTAL габарита 4U конструктива "Евромеханика" (рис.2).

В верхней части кассеты, закрытой фальш-панелью, размещены электронные ячейки габарита 3U. В нижней части кассеты установлен пульт местного управления регулятора габарита 1U.

На задней стороне кассеты в верхней ее части установлен блок преобразователей токов и напряжений с клеммами для подключения цепей от трансформаторов напряжения и тока. В нижней части кассеты установлен клеммник для подключения цепей питания и заземления, а также разъемы для подключения цепей дискретных сигналов.

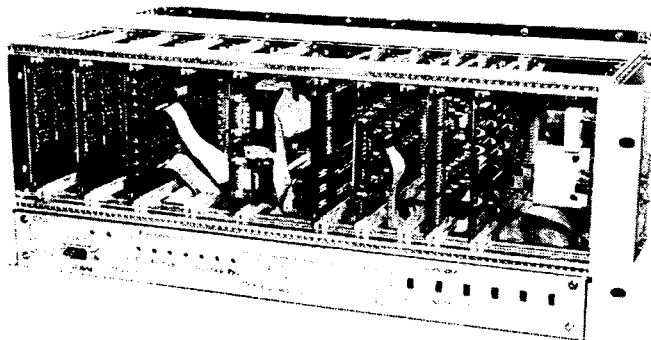


Рис.2. Конструкция АРВ-М

АВТОРЫ, ОПУБЛИКОВАННЫХ СТАТЕЙ



Козлов Вадим Борисович — генеральный директор ВЭИ. Окончил в 1961 г. электроэнергетический факультет МЭИ. Кандидатскую диссертацию защитил в 1983 г. по теме "Вакуумная коммутационная аппаратура". Заслуженный машиностроитель России, лауреат Государственной премии России.



Данилин Вячеслав Васильевич — начальник сектора ВЭИ. В 1970 г. окончил МЭИ. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Лебедева Наталья Викторовна — ведущий инженер ВЭИ. Окончила приборостроительный факультет МВТУ в 1968 г.



Левицкая Евгения Игоревна — начальник сектора ВЭИ. В 1957 г. окончила электромеханический факультет МЭИ.



Ковалев Виктор Дмитриевич — первый заместитель генерального директора ВЭИ. Окончил в 1969 г. электроэнергетический факультет МЭИ. Докторскую диссертацию защитил в 1997 г. по теме "Методы и средства противоаварийного управления для обеспечения устойчивости электроэнергетических систем".



Ивакин Виктор Николаевич — начальник сектора ГНЦ ВЭИ. Окончил МЭИ в 1975 г. В 1987 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию по специальности "Электрические станции, сети и системы и управление ими".

Логинов Александр Гаврилович — главный конструктор систем возбуждения АО "Электросила".



Лукацкая Ида Абрамовна — ведущий научный сотрудник ВЭИ. В 1950 г. окончила факультет электровакуумного приборостроения МЭИ. В 1964 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме "Высоковольтные силовые вакуумные дугогасительные камеры (исследование дуги и разработка конструкций)".



Белкин Герман Сергеевич — начальник отдела ВЭИ. В 1962 г. окончил электроэнергетический факультет МЭИ. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Работоспособность контактов из многокомпонентных материалов в высоковольтных вакуумных аппаратах".



Ковалев Сергей Викторович — инженер предприятия АББ ВЭИ Метроника. Окончил в 1993 г. факультет автоматки и вычислительной техники МЭИ.

Лукин Иван Николаевич — ведущий инженер ВЭИ. Окончил факультет автоматики и вычислительной техники МИРЭА в 1987 г.



Бондалетов Владимир Николаевич — директор ВНИЦ ВЭИ. Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1962 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Индукционное ускорение проводников в полях, создаваемых разрядами мощных конденсаторных батарей" в 1965 г., докторскую диссертацию по теме "Силовое воздействие импульсных магнитных полей на проводники" — в 1978 г. Профессор, академик АЭН РФ.



Кокуркин Михаил Павлович — ведущий научный сотрудник ВЭИ. В 1970 г. окончил МЭИ. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию.

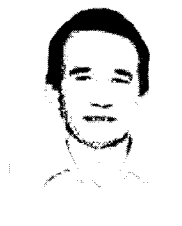


Лурье Александр Иосифович — ведущий научный сотрудник ВЭИ им. В.И.Ленина. В 1958 г. окончил электромеханический факультет МЭИ. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Исследование и применение математического моделирования магнитных полей рассеяния трансформаторов и реакторов на электропроводящей бумаге". Доктор электротехники, член-кор. АЭН РФ.

Волкова Ольга Владимировна — ведущий научный сотрудник ВЭИ. Окончила электроэнергетический факультет МЭИ в 1958 г. В 1970 г. в ВЭИ защитила кандидатскую диссертацию по исследованию разрядных характеристик защитных воздушных промежутков.



Кузькин Виктор Игоревич — директор НИЦ ВЭИ. Окончил в 1967 г. факультет "Автоматика и телемеханика" МЭИ. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Управление стабилизированными инверторами тока АБП".



Мелешкин Валерий Николаевич — начальник сектора ВЭИ им. В.И.Ленина. В 1963 г. окончил факультет "Автоматика и вычислительная техника" МИИТ. В 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Бесконтактные регуляторы напряжения для генераторов управления подвижного состава". Доцент.

Мельников Владимир Сергеевич — начальник отдела ВЭИ. Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1960 г. В 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка и исследования системы ограничения мощности турбоагрегата".



Мордкович Анатолий Григорьевич — начальник сектора ВЭИ. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1967 г. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Мясищев Сергей Вячеславович — ведущий инженер ВЭИ им. В.И.Ленина. В 1992 г. окончил факультет "Автоматика и вычислительная техника" МЭИ.

Несвижский Александр Михайлович — ведущий инженер ВЭИ. Окончил факультет автоматики и вычислительной техники МИРЭА в 1988 г.



Орлов Владимир Николаевич — начальник сектора ВЭИ. Окончил факультет прикладной математики МИЭМ в 1976 г. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка методов выявления метрологических отказов измерительных каналов электрических параметров в АСУ ТП гидроэлектростанций".

Остапенко Евгений Ильич — ГУП ВЭИ. Окончил ЭЭФ Харьковского политехнического института им. В.И.Ленина в 1961 г. В 1981 г. защитил диссертацию по теме "Электрическая прочность внешней изоляции аппаратов сверхвысокого напряжения переменного тока при загрязнении".



Панибратец Анатолий Николаевич — ведущий научный сотрудник ВЭИ. В 1972 г. окончил электромеханический факультет Одесского политехнического института. В 1999 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Исследования и расчеты электродинамической стойкости при коротких замыканиях мощных силовых трансформаторов".



Пашин Михаил Михайлович — начальник отдела ВЭИ. В 1962 г. окончил МЭИ. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Перцев Алексей Александрович — ведущий научный сотрудник ВЭИ. В 1957 г. закончил радиотехнический факультет ВЗПИ. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Статическая электрическая прочность высоковольтных ртутных вентиляей".



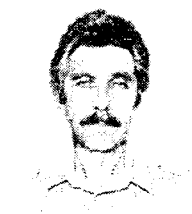
Петерсон Андрей Львович — ГУП ВЭИ. Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И.Калинина в 1973 г. В 1981 г. защитил диссертацию по теме "Теоретическое и

экспериментальное исследование твердого диэлектрика в изоляционных конструкциях герметизированных распределительных устройств и газоизолированных линий электропередачи".

Пуресев Николай Иванович — начальник отдела ВНИИЦ ВЭИ. В 1974 г. окончил Новочеркасский политехнический институт. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Ромочкин Юрий Геннадьевич — начальник сектора ВЭИ. В 1979 г. окончил факультет "Энергомашиностроение" МВТУ им. Н.Э.Баумана. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Исследование адсорбционного вакуумного насоса с поверхностями различной конфигурации".



Серебряков Анатолий Залманович — ведущий инженер ВЭИ. Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1971 г.



Сморodin Анатолий Иванович — начальник отдела ОАО "Криогенмаш". В 1961 г. окончил МИХМ. В 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Тарасов Александр Анатольевич — начальник сектора ВЭИ. Окончил факультет электронной техники МЭИ в 1970 г.



Таратура Игорь Петрович — и.о.генерального директора АО "Ансальдо-ВЭИ". В 1973 г. окончил Московский институт инженеров транспорта. В 1950 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Ульянов Евгений Константинович — инженер ВЭИ. В 1993 г. окончил факультет "Электронная техника" МЭИ.

Усачев Валерий Владимирович — главный инженер Березовской ГРЭС-1.



Фадеев Алексей Владимирович — начальник сектора ВЭИ. Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1964 г. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Цфасман Григорий Матвеевич — ведущий научный сотрудник ВЭИ. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1964 г. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Чугунников Юрий Васильевич — начальник сектора ВЭИ. Окончил факультет автоматики и вычислительной техники МИИТ в 1971 г.



Чуприков Виктор Сергеевич — заместитель генерального директора АО "Ансальдо-ВЭИ". В 1973 г. окончил МЭИ. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию.

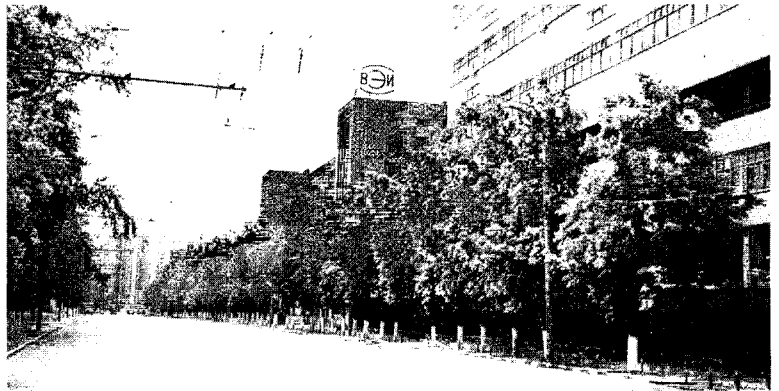
Якивчик Николай Иванович — начальник сектора ГУП ВЭИ. Канд. техн. наук.



основан в 1921 г.

Направления деятельности НИЦ и филиалов ГНЦ "Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина"

Основная исследовательская база ГНЦ ВЭИ находится в Москве в районе Лефортово и занимает территорию 14,6 га. На этой территории кроме научно-инженерных центров (НИЦ) находятся также Опытный завод ВЭИ, испытательные стенды с уникальным оборудованием, технопарк, совместные предприятия. Филиалы ВЭИ располагаются в городах Истра и Тольятти.



1. Научно-инженерный центр высоковольтной техники (НИЦ ВТ)

Высоковольтное оборудование, в том числе трансформаторы, элегазовые и вакуумные выключатели, вакуумные камеры. Озонаторы. Аппаратура и методики для диагностики высоковольтного оборудования. Ограничители перенапряжений.

2. Научно-инженерный центр по испытаниям электротехнического оборудования (НИЦ "Тест")

Исследования и испытания оборудования для передачи и распределения электроэнергии на высоком напряжении. Разработка методик испытаний и испытательных стендов.

3. Научно-инженерный центр силовых полупроводниковых приборов (НИЦ СПП)

Полупроводниковые материалы; конструкции и технологии изготовления силовых полупроводниковых приборов; выпуск опытных партий (транзисторы, тиристоры, диоды, резисторы и т.д.) для силовой электроники на токи от 10 до 5000 А и напряжения до 6000 В.

4. Научно-инженерный центр разработки комплексов электрооборудования и автоматизации энергосистем (НИЦ "Комплекс")

Системы автоматизированного управления энергообъектами и энергосистемами, в том числе каскадами гидроэлектростанций. Контрольно-измерительное и диагностическое оборудование для энергетиков.

5. Научно-инженерный центр электронных систем электротехники (НИЦ "ЭЛСИЭЛ")

Частотные преобразователи для асинхронных электродвигателей от 5 до 250 кВт, агрегаты бесперебойного питания для ответственных потребителей; выпрямители с высокой степенью стабилизации выходных параметров, аппаратура преобразования электроэнергии, в том числе и для подвижного состава железных дорог.

6. Научно-инженерный центр силовой электроники (НИЦ СЭ)

Оборудование электропитания электронно-лучевых установок, системы пылеулавливания; интенсивные источники света, СВЧ-устройства.

7. Научно-инженерный центр по проблеме сверхпроводимости (НИЦ "Энергия")

Тепловые процессы в металлах, полупроводниках и диэлектриках, технологии изготовления сверхпроводящих элементов, электронно-лучевые установки.

8. Научно-инженерный центр материаловедения и диагностики (НИЦ Мид)

Электротехнические материалы систем изоляции электрических машин, термоэлектрических устройств. Оборудование и методики для диагностики электротехнических устройств, методики ремонта высоковольтного электротехнического оборудования.

9. Научно-инженерный центр электроизоляционных материалов (НИЦ ЭИМ)

Электроизоляционные материалы; лаки и компаунды, фольгированные диэлектрики.

10. Научно-инженерный центр защитных устройств (НИЦ ЗУ)

Защитные устройства для широкого круга объектов; защита электротехнического оборудования от электромагнитных импульсов; системы автономной энергетики.

11. Научно-инженерный центр "Плазма - Свет" (НИЦ ПС)

Устройства на основе световых, лазерных и плазменных приборов для медицины, экологии и авиационной метеорологии.

12. Информационно-маркетинговый центр ВЭИ (ИМЦ ВЭИ)

Информационное обеспечение работ; технологические обследования НИЦ (технологический аудит), рекламно-выставочная деятельность и трансферт технологий, разработка и поддержка Интернет-сайта.

13. Высоковольтный научно-исследовательский центр ВЭИ (ВНИЦ ВЭИ, г. Истра)

Высоковольтные источники питания и оборудование. Исследования влияния высоковольтных импульсов напряжения и тока на различные материалы и оборудование.

14. Опытный завод ВЭИ (ОЗ ВЭИ)

Выпуск различного электротехнического оборудования, разработанного как в ВЭИ, так и на ОЗ ВЭИ, в том числе тиристоры, диоды, вакуумные выключатели, управляемые сборки.



РАЗРАБОТКИ ГНЦ "Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина"

За последние годы в институте выполнено более 50 работ на уровне, превышающем мировой, что подтверждено патентами, дипломами международных выставок и имеющимися ноу-хау.

Сформировавшиеся за эти годы научные направления института позволили выполнить и внедрить в промышленность большое количество оригинальных разработок, в том числе представленные здесь:

<p>КРУЭ 220 кВ с совместным расположением фаз в одной оболочке</p>		<p>Комплект испытательного оборудования выключателей высокого напряжения</p>	
<p>Подвагонный преобразователь ПТК - 2М</p>		<p>Мощный статический преобразователь частоты с компенсирующим устройством 100 - 3600 кВА</p>	
<p>Универсальный аварийный регистратор для энергосистем "БАРС"</p>		<p>Система диагностики состояния трансформаторов "Импульс-8"</p>	
<p>Коммутатор вакуумный постоянного и переменного тока на 4 кВ</p>		<p>Электронно-лучевая пушка ВТР 200-300/25</p>	
<p>Мощные кремниевые резисторы таблеточного исполнения</p>		<p>Регистратор высоты облаков РВО-3</p>	
<p>СВЧ световой прибор "СВЭТОН"</p>		<p>Более подробная информация о деятельности ГНЦ ВЭИ - на сайте WWW.VEI.RU</p>	

Наш адрес: **ПРИГЛАШАЕМ ВАС К СОТРУДНИЧЕСТВУ!**
 Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.12 Тел./факс (095) 362-56-17,
 Интернет - сайт: www.vei.ru e-mail: imc@vei.ru Информационный отдел: (095) 361-90-02

Государственный научный центр Российской Федерации
 "Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина"

ISSN 0013-5860 Электротехника. 2001. № 9. 1-64.