

ISSN 0013-5860

# **Электротехника**

## **9 2006**



МЕДАЛЬ  
"ЗА ЗАСЛУГИ В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



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

#### УЧРЕДИТЕЛИ

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

#### СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

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.**

АНОШИН О.А., БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., ЕВСЕЕВ Ю.А.,  
ИНЬКОВ Ю.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П., ЛАЗАРЕВ Г.Б., ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,  
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А., РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора),  
ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б., ФИНКЕЛЬ Э.Э.

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

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

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

В редакции можно подписаться на журнал с  
любого месяца и приобрести отдельные номера за  
прошлые и нынешний годы.

При перепечатке ссылка на журнал  
«Электротехника» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой  
зрения авторов статей.

За содержание рекламных материалов редакция  
ответственности не несёт.

Рукописи статей не возвращаются.

**Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.**

**Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (495) 361-95-96  
E-mail [elektrotehnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotehnika@mtu-net.ru)**

Редактор отдела О.В. Кунавина.  
Научный редактор Л.А. Романова.  
Редактор З.П. Фёдорова

Сдано в набор 06.06.2006. Подписано в печать 26.07.2006. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 131

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»  
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

© «Электротехника», 2006 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека  
[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

Белкин Г.С., Дробышевский А.А., Ивакин В.Н., Ковалев В.Д., Панибратец А.Н. Перспективные виды электротехнического оборудования .....	2
<b>ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ</b>	
Остапенко Е.И. Методы выбора конструкции изоляции для районов с загрязнённой атмосферой .....	10
Быковец Ю.Я., Егоров В.Г., Сeryakov К.И., Торопчин Ю.В., Чемерис В.С., Гоев А.В. Элегазовые коммутационные аппараты номинального напряжения 10 кВ для ячеек КРУ и КСО .....	13
Елагин В.Н., Зенова В.П., Коробов О.Г., Панибратец А.Н. Определение эффективности склейки транспонированного провода с целью повышения радиальной устойчивости обмоток трансформаторов при коротком замыкании .....	17
Алфёров Д.Ф., Белкин Г.С., Ивакин В.Н., Иванов В.П., Сидоров В.А. Новые системы защиты электротехнического оборудования от перенапряжений и токовых перегрузок .....	21
Алмазов В.А., Люцарева Л.А., Платова Е.С., Любимова В.А., Полова Н.А. Влияние химического состава добавок на свойства варисторов на основе оксида цинка .....	26
<b>ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА</b>	
Перцев А.А., Петерсон А.Л., Рыльская Л.А. Особенности испытаний вакуумных выключателей током короткого замыкания .....	29
Дробышевский А.А., Левицкая Е.И., Лурье А.И., Панибратец А.Н. Комплексная оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов при испытаниях и в эксплуатации .....	33
Овчаров И.В. Увеличение дальности действия тепловизоров при исследовании высоковольтного электрооборудования .....	39
<b>ЭНЕРГЕТИКА</b>	
Ивакин В.Н., Магницкий А.А., Шульга Р.Н. Применение установок тиристорно-управляемой продольной компенсации на линиях электропередачи переменного тока .....	42
<b>СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ</b>	
Петерсон А.Л., Быструев А.К., Лядвинский И.Е., Кондрьчин Э.В., Носик Л.П., Собакар Т.В. Микропроцессорная система автоматического управления опытами в лабораториях больших мощностей .....	50
Логинов А.Г., Фадеев А.В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа AVR-2М для систем возбуждения завода "Электросила" .....	54
Валуйских А.О., Крайачич А.В., Цфасман Г.М. Контроль повышений напряжения в системах мониторинга трансформаторного оборудования .....	58
<b>СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ</b>	
Чванов В.А. Перспективная преобразовательная техника .....	61
Дерменжи П.Г., Локтаев Ю.М., Ставцев А.В., Черников А.А. Стойкость тиристоров к эффекту $di/dt$ с учётом лавинного умножения электронов и дырок .....	66
Асина С.С., Смирнов А.А., Карпинский В.Н., Кондрашов Е.И. Исследование возможности применения мощных кремниевых шунтов в системе питания сверхпроводящего ускорителя .....	70
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ</b>	
Маслов В.А., Панов А.А., Крупенин Н.В., Гроздов А.Г. Вольт-амперные характеристики полупроводящих лент и эмалей .....	73

## CONTENTS

Belkin G.S., Drobyshevskii A.A., Ivakin V.N., Kovalev V.D., Panibratets A.N. The perspective types of Electric power equipment .....	2
<b>HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT</b>	
Ostapenko E.I. Methods for selection of insulation design for polluted areas .....	10
Bykovets Yu.Ya., Egorov V.G., Seryakov K.I., Toropchin Yu.V., Chemeris V.S., Goev A.V. 10 kV SF <sub>6</sub> apparatus for metal-enclosed switchgear compartments .....	13
Elagin V.N., Zenova V.P., Korobov O.G., Panibratets A.N. Definition of efficiency of the glueing of the transposed conductor to raise the radial stability of transformer windings at short circuits .....	17
Alferov D.F., Belkin G.S., Ivakin V.N., Ivanov V.P., Sidorov V.A. New systems of protection of the electrical equipment from overvoltages and current overloads .....	21
Almazov V.A., Lutsareva L.A., Platova E.S., Lubimova V.A., Popova N.A. The influence chemical composition additives on properties of varistors .....	26
<b>TEST AND DIAGNOSTICS</b>	
Pertsev A.A., Peterson A.L., Rylskaya L.A. Peculiarities of testing vacuum circuit-breakers with short-circuit current .....	29
Drobyshevskii A.A., Levickaja E.I., Lurie A.I., Panibratets A.N. Multipronged assessment of power transformer winding mechanical condition during tests and in service .....	33
Ovcharov I.V. The increase in the reach of thermal imagers during inspection of high voltage equipment .....	39
<b>ENERGY</b>	
Ivakin V.N., Magnitskii A.A., Shulga R.N. Application of thyristor controlled series compensation on transmission lines .....	42
<b>SYSTEMS OF THE AUTOCONTROL AND REGULATIONS</b>	
Peterson A.L., Bystruev A.K., Lyadvinskii I.E., Kondrychin, Nosik L.P., Cobakar T.V. Microprocessor system of automatic control of tests in High Power Laboratories .....	50
Loginov A.G., Fadeed A.V. Microprocessor automatic regulator of type AVR-2M for systems of excitation for generators manufactured at factory "Electrosila" .....	54
Valuiskih A.O., Krayachich A.V., Tsfasman G.M. The control of overvoltages in systems of monitoring of the transformer equipment .....	58
<b>POWER SEMICONDUCTOR INSTRUMENTS</b>	
Chvanov V.A. Perspective transforming technique .....	61
Dermenzi P.G., Loktaev Yu.M., Stavtsev A.V., Chernikov A.A. Thyristors resistance to the effect of $di/dt$ taking into account avalanche multiplication of electrons and holes .....	66
Asina S.S., Smirnov A.A., Karpinskii V.N., Kondrashov E.I. Investigation of applicability of power silicon shunt in power supply superconducting accelerator ..	70
<b>ELEKTRICAL MATERIALS</b>	
Maslov V.A., Panov A.A., Krupenin N.V., Grozdov A.G. Current-voltage characteristics of semiconducting tapes and enamels .....	73



# ГОСУДАРСТВЕННОМУ УНИТАРНОМУ ПРЕДПРИЯТИЮ «ВСЕРОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА» 85 ЛЕТ

Стало уже традицией выпускать специальный номер журнала «Электротехника» к юбилейной дате Государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина» (ГУП ВЭИ). Вот и сегодня, спустя 85 лет со дня образования по указу В.И. Ленина Государственного экспериментального электротехнического института (так он вначале назывался), мы подготовили такой выпуск. Институт создавался для решения первоочередных научных задач плана электрификации России (план ГОЭЛРО). Решение сегодняшних проблем энергобезопасности и энергоэффективности российской экономики – не менее важная задача, и ВЭИ как Государственный научный центр Российской Федерации успешно участвует в её решении.

В этом журнале авторы статей представили наши достижения в разных направлениях электротехники и энергетики, которыми традиционно занимается ВЭИ: высоковольтное оборудование и силовая электроника, системы автоматического управления и регулирования, преобразовательная техника, электротехнические материалы, испытания и диагностика.

Выражаем искреннюю благодарность сотрудникам редакции «Электротехники» и заместителю главного редактора О.В. Слежановскому за большую и квалифицированно выполненную работу по подготовке и выпуску юбилейного номера.

**А.Н. Панибратец**, первый заместитель генерального директора ГУП ВЭИ

## Перспективные виды электротехнического оборудования

БЕЛКИН Г.С., ДРОБЫШЕВСКИЙ А.А., ИВАКИН В.Н., КОВАЛЕВ В.Д., ПАНИБРАТЕЦ А.Н.

*Приведён краткий анализ деятельности СИГРЭ последних лет в части разработки перспективных видов электрооборудования, основанный на участии ВЭИ в работе комитетов и рабочих групп СИГРЭ.*

*Gives a brief analysis of CIGRE and IEC's recent activities concerning the development of promising electrical equipment based on participation of VEI in the work of committees and working groups.*

На протяжении многих лет ВЭИ активно участвует в работе международных электротехнических организаций: Международный совет по большим электрическим системам (СИГРЭ), где ВЭИ ведёт от России три исследовательских комитета, и Международная электротехническая комиссия (МЭК).

СИГРЭ осуществляет координацию международной деятельности по исследованиям, разработкам, производству и эксплуатации электротехнического оборудования, а МЭК – по вопросам международной стандартизации и техническому регулированию.

В статье описаны разработки последних лет 3 комитетов СИГРЭ, в которых участвует ГУП ВЭИ.

### Исследовательский Комитет А2 "Трансформаторы"

После длительного периода устойчивого роста мощности и напряжения трансформаторного оборудования в настоящее время акценты сместились, в основном, к применению новых материалов для магнитопроводов, проводников, электрической изоляции, анализу переходных процессов, а также к диагностике и обслуживанию оборудования на месте установки, включая восстановление, ремонт, модернизацию и испытания. Эти вопросы рассматривались на сессии 2004 г. и на коллоквиуме в Москве в 2005 г.

Трансформаторы с использованием высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов. В настоящее время в ряде стран (США, Германии, Франции, Дании, Японии, России и Китае) освоено или подготовлено промышленное производство ВТСП материалов, пригодных для создания и производства некоторых видов силового электротехнического оборудования, в частности, силовых трансформаторов [1]. Актуальность разработки обусловлена необходимостью снижения потерь электроэнергии при её передаче и преобразовании. Другим побудительным фактором применения ВТСП – материалов являются растущие требования к уменьшению размеров электрооборудования и соответствующему уменьшению занимаемых площадей, что особенно существенно в условиях города. Кроме того, ВТСП трансформатор будет обладать большей удельной мощностью. С учётом международного опыта ВЭИ совместно с другими научно-исследовательскими и производственными предприятиями отрасли предполагает в 2007–2012 гг. разработать ВТСП трансформатор мощностью 1000 кВ·А, содержащий обмотки, охлаждаемые до уровня температур жидкого азота, и магнитопровод, находящийся в тепловом контакте с окружающей средой.

Из основных экономических, эксплуатационных и экологических преимуществ создаваемого на основе ВТСП трансформатора следует назвать: меньшие нагрузочные потери (на 70–90%), массу и размеры по сравнению с обычными трансформаторами; отсутствие теплового старения изоляции; меньшая опасность для окружающей среды благодаря замене масла экологически чистым и дешёвым жидким азотом.

**Трансформаторы с элегазовой изоляцией.** Очевидными преимуществами элегазовых трансформаторов (ЭТ) являются их экологичность и пожаробезопасность. Однако существенно меньшие импульсная прочность и теплопередающая способность элегаза заставляют значительно увеличивать давление  $\text{SF}_6$  внутри бака трансформатора ( $2,5 \text{ кг/см}^2$  и выше) что делает применение ЭТ экономически невыгодным. В связи с этим представляет интерес разработка ЭТ мощностью 20 МВ·А 154 кВ фирмой "КЕРСО" (Южная Корея) с низким давлением  $\text{SF}_6$ :  $1,2\text{--}1,4 \text{ кг/см}^2$ . При таком давлении изоляционные свойства при напряжении 50 Гц примерно как у масла, однако импульсная прочность сильно зависит от распределения электрического поля, что подразумевает высокие требования к конструкции изоляции и выбору материала твердой изоляции, в первую очередь, в клинообразных промежутках между витками и отдельными секциями (катушками), где возникает наибольшая напряжённость поля. Эта проблема была решена применением композитной изоляции из материалов с высокой и низкой диэлектрической проницаемостью, размещаемых в зонах с максимальной напряжённостью поля. Эффективность системы охлаждения (газ, охлаждаемый водой), позволяющей обеспечить необходимый теплоотвод от обмоток и магнитопровода даже при столь низком давлении элегаза, была достигнута благодаря правильному выбору тепловой модели и проведению трёхмерного численного анализа, в результате чего были определены типы обмоток, размеры каналов охлаждения, оптимальные потоки ввода – вывода газа. Прототип успешно прошёл все диэлектрические и термические испытания. Ведутся исследования (в том числе в ВЭИ) по возможности применения других изоляционных газов.

**Кабельные трансформаторы.** Прорывом в области трансформаторных технологий можно назвать новый тип трансформатора – Dryformer, разработанный компанией АВВ, обмотки которого выполняются из кабеля: внутри пучок многожильного провода (медный или алюминиевый), заключённый в тонкий слой полупроводящего материала (для исключения неравномерности поля из-за многослойности). Все это заключается в полиэтилен, толщина которого выбирается из соображений электрической прочности (практически достижим уровень

напряжения 220 кВ). Наружная оболочка–экран, выполненная также из полупроводящего материала, заземляется на каждом витке вдоль обмотки, т.е. электрическое поле полностью заключено внутри твердого диэлектрика. Трансформатор имеет воздушное охлаждение. Отсутствие масла, снижение более чем вдвое доли горючих материалов по сравнению с обычным трансформатором устраняют риск пожара, взрыва, загрязнения воды и почвы при повреждении трансформатора. Это позволяет применять такие аппараты в зонах с большой плотностью населения, в подземных установках, в экологически охраняемых регионах. Повышается безопасность эксплуатации для персонала. Для такого трансформатора не нужны вводы ВН, просто кабель протягивается к распределительному устройству на любую длину. Принципиально Dryformer снижает общие потери в сети благодаря тому, что его можно установить как угодно близко к месту нагрузки. Перегрузочная способность обычного трансформатора ограничена термостойкостью маслбумажной изоляции и сроком службы масла. Для Dryformer перегрузка ограничена не старением изоляции, а снижением механической прочности обмотки, изолированной полиэтиленом при повышении температуры. Другим недостатком такого трансформатора является высокая цена (примерно вдвое выше, чем у традиционной конструкции). Первый в мире силовой трансформатор без масла, с обмоткой кабельного типа, разработанный для установки в помещении, имеет мощность 20 МВ·А и напряжение 140/6,6 кВ. За последние годы "ABB Transformatoren" получила значительное количество заказов на поставку трансформаторов данного типа в разных частях мира.

**Трансформаторы с гибридной изоляцией.** Хотя подход к проектированию трансформаторов со смешанной изоляцией известен с 80-х годов, последний опыт передовых зарубежных фирм доказывает, что появление новых высокотемпературных изоляционных материалов создаст новые возможности. Обычно силовые трансформаторы имеют комбинированную изоляцию: твёрдая – целлюлозная, жидкая – минеральное масло. Нагрузочная способность трансформатора может быть существенно повышена, а процесс старения изоляции снижен за счёт применения так называемой "гибридной" изоляции, когда в наиболее нагретых частях обмоток целлюлозная изоляция заменяется на высокотемпературную арамидную изоляцию (рис.1).

Для двух элементов, работающих при одинаковой температуре, изоляция отвода из обычной бумаги старится в 2 раза быстрее высокотемпературной. При этом благодаря тому, что дорогостоящая высокотемпературная изоляция применяется в очень ограниченных объёмах (для изоляции прово-

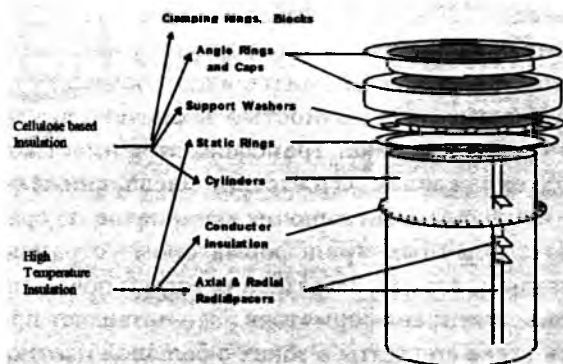


Рис.1. Пример обмотки с гибридной изоляцией

дов отдельных частей обмотки, ёмкостных кол дистанцирующих прокладок, формирующих охлаждающие каналы), стоимость трансформатора по шаается незначительно. Применение гибридной лияции позволяет не только уменьшить массу и габариты трансформатора, но и снизить расходы на его обслуживание (уменьшение выделения газов из твердой изоляции в масло требует меньшего объёма работ по очистке масла). Существенным преимуществом является незначительная усадка арамидных материалов под воздействием сил сжатия: исследования показали, что эти материалы практически безупадочны при температурах до 150°C, что гарантирует сохранение начального уровня запрессовки обмоток – важного фактора в обеспечении стойкости трансформатора при КЗ. Примером успешного применения новой технологии с использованием гибридной изоляции является трансформатор 300 МВ-А 230 кВ, спроектированный недавно в Бразилии.

В последние годы на первое место выдвинулись эксплуатационная надёжность, экономические и экологические аспекты. С одной стороны, это вызвано тем, что в промышленно развитых странах основная часть трансформаторов состарилась, с другой, отмена государственного регулирования заставила по-другому взглянуть на эти проблемы. В связи с этим увеличилась важность более точной оценки технического состояния оборудования и его остаточного срока службы, обеспечивающих надёжную эксплуатацию трансформаторов.

Можно выделить 4 основных фактора, влияющих на ухудшение состояния трансформатора в процессе его эксплуатации: 1) термический фактор – снижение степени полимеризации и механической прочности бумаги со временем, включая возможное образование пузырьков от увлажненной бумаги из-за резкого роста температуры при перегрузках; 2) электрический фактор – снижение диэлектрической прочности изоляции при повторяющихся грозовых или коммутационных воздействиях, а в ряде случаев при электростатических разрядах; 3) механический фактор – ослабление механической проч-

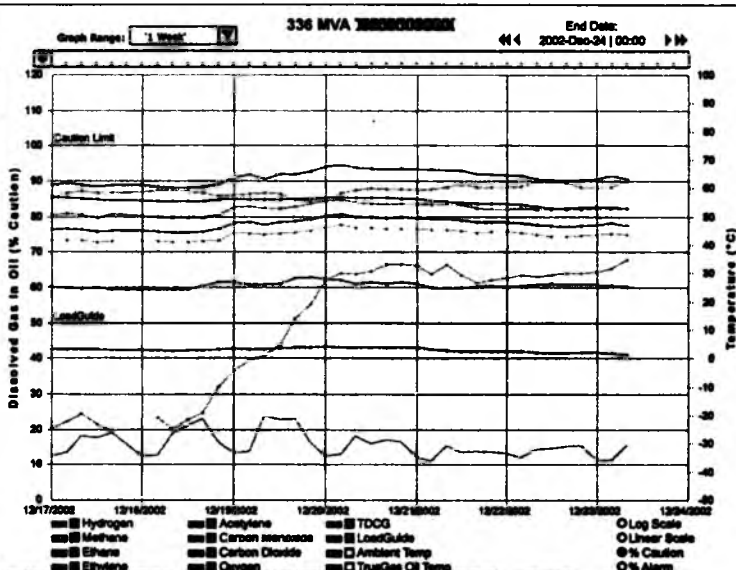


Рис.2. Пример он-лайн мониторинга по 8 газам

ности под воздействием токов КЗ и токов включения; 4) фактор окружающей среды, влияющий, в основном на бак и его герметичность.

Возросшие требования к эксплуатационной надёжности привели в последние годы к значительному прогрессу в развитии средств и методов диагностики и интерпретации результатов измерений при оценке состояния трансформаторов в эксплуатации. В связи с тем, что масло как диагностическая среда, содержит до 70% информации о состоянии трансформатора, все современные системы мониторинга включают в себя те или иные средства для оценки состояния масла. Выход на рынок новых современных приборов и датчиков с увеличенной чувствительностью и точностью, позволяющих осуществлять одновременный контроль до 8 растворенных газов и влаги одним устройством (системы TransFix – фирма "Kelman", TM8 – фирма "Serveron", рис.2), меняет сложившийся стереотип о том, что контроль растворённых газов в режиме он-лайн значительно уступает по качеству результатам измерений в условиях лаборатории. Тем не менее, единодушно признается, что периодический контроль оборудования в режиме офф-лайн нужен во всех случаях. В связи с этим представляет практический интерес развитие методов диагностики, основанных на частотном анализе контролируемых процессов: методы измерения тока поляризации-деполяризации, методы частотного анализа: диэлектрический и механический.

Одним из таких приборов, приобретённым недавно ВЭИ и предназначенным для хроматографического анализа растворённых в масле газов, является портативный хроматограф Transport-X (фирма "Kelman", Великобритания), рис.3. Высокие технические характеристики и надёжность результатов прибора обеспечиваются применением метода фото-акустической спектроскопии. Прибор позво-





Рис.3. Портативный хроматограф Transport-X

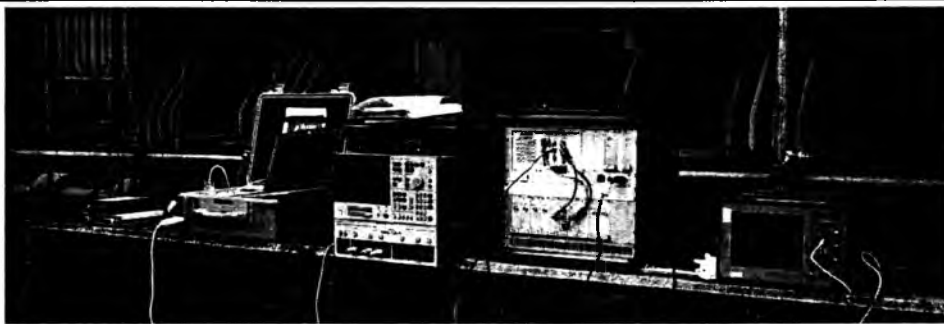


Рис.4. Приборы для диагностики методом частотного анализа во время совместных международных экспериментов на автотрансформаторе 500 МВ·А ("Кент", Великобритания)

ляет производить в полевых условиях (на месте установки электрооборудования) анализ 7 ключевых газов и содержание влаги в масле. Достоинствами прибора являются его компактность, простота обслуживания, отсутствие необходимости в расходных материалах.

Метод частотного анализа (в России известный как метод низковольтных импульсов) является самым чувствительным инструментом для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов в эксплуатации. ВЭИ, являющийся лидером в России и СНГ по развитию этого метода, наряду с некоторыми другими странами с 2004 г. участвует в деятельности специальной рабочей группы СИГРЭ, целью которой является обобщение опыта применения метода в разных странах, разработка общих принципов, критериев оценки, методики диагностики при сохранении многообразия подходов и инструментов. На рис.4 показаны диагностические установки производителей разных стран – участников совместных экспериментов на реальном объекте – автотрансформаторе 500 МВ·А, 400/275 кВ. Разработанная в ВЭИ установка "Импульс-8" выполнена с учётом результатов деятельности и ряда рекомендаций рабочей группы СИГРЭ.

#### Исследовательский комитет АЗ "Оборудование высокого напряжения"

На сессии СИГРЭ 2004 г. и на коллоквиуме в Токио в 2005 г. обсуждались следующие темы:

1. Развитие оборудования высокого напряжения, его повреждаемость и применение перспективных видов измерительных трансформаторов.
2. Комбинированные электрические аппараты высокого напряжения и объединение их функций.
3. Проблемы, связанные с применением электрических аппаратов высокого напряжения, в том числе экологические вопросы.
4. Опыт эксплуатации подстанций новой конструкции и компоновки.

Хотя на мировом рынке в ближайшее время не видно серьезной альтернативы вакуумным и элегазовым аппаратам, работы по совершенствованию коммутационной аппаратуры продолжа-

ются. Проводятся работы по повышению эффективности дугогашения, расширению области применения аппаратов, поиску альтернативных решений, снижению воздействий на оборудование и окружающую среду. Среди путей повышения эффективности дугогашения можно отметить сочетание различных способов гашения дуги в одном дугогасительном устройстве, например, сочетание элегазового дугогасительного устройства и последовательно соединённой вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) [2]. При отключении цепи сначала размыкаются контакты в вакууме, а затем с некоторой задержкой в элегазе. Тем самым используются преимущества обоих дугогасительных устройств – высокая скорость восстановления электрической прочности вакуумного промежутка в начале процесса восстановления напряжения и высокая электрическая прочность элегазового промежутка в дальнейшем. Это может способствовать снижению необходимого давления элегаза, что особенно важно при эксплуатации в районах с холодным климатом.

Прорабатываются вопросы, связанные с применением коммутационных аппаратов с управляемой коммутацией. Изучаются воздействия на оборудование при управляемой коммутации конденсаторных батарей, повторном включении линии, включении холостых трансформаторов при учёте остаточного магнитного потока и др.

Следует отметить, что существенное снижение перенапряжений и бросков тока происходит только при управляемой коммутации с очень высокой для высоковольтных выключателей точностью ( $\pm 1$  мс и менее). Снижение разбросов собственного времени выключателя до столь низкого уровня является очень сложной задачей, и это требование во многом сдерживает широкое применение выключателей с управляемой коммутацией. В ГУП ВЭИ проводятся работы по созданию гибридного управляемого выключателя. В нём каждый полюс шунтируется быстродействующим элементом – вакуумным управляемым разрядником (ВУР). ВУР способен включаться за время порядка нескольких микросекунд и с точностью до одной микросекунды, т.е. временные характеристики ВУР намного лучше,

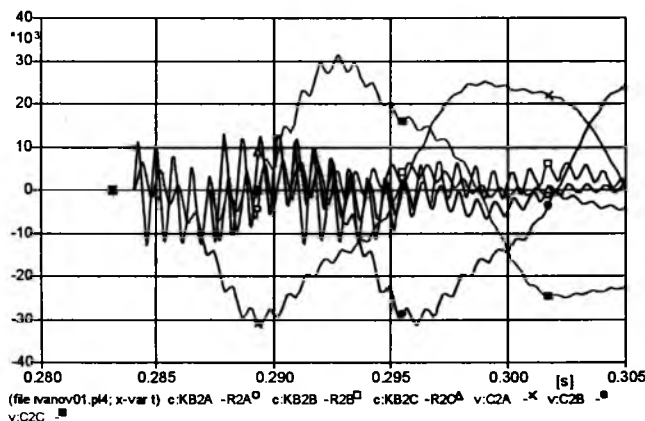


Рис. 5. Диаграммы токов и напряжений при пофазном включении незаряженной КБ<sub>2</sub> при включенной КБ<sub>1</sub>, когда замыкание контактов Q<sub>2</sub> происходит за 1 мс до перехода напряжения через 0 в каждой фазе

чем у контактных аппаратов. Использование гибридного управляемого выключателя полностью устраняет, например, броски тока при включении составных конденсаторных батарей (рис. 5, 6), броски тока при включении ненагруженных трансформаторов, продляет срок службы оборудования.

Развитием идей управляемой коммутации стали работы ГУП ВЭИ по созданию быстродействующих управляемых защитных устройств (БУЗУ) на основе вакуумных управляемых разрядников (ВУР), которые способны включаться за малое время (единицы микросекунд) и пропускать большие токи (десятки килоампер). Прорабатывается быстродействующая система защиты основного оборудования устройств продольной компенсации с тиристорным управлением от перенапряжений и токов перегрузки. Защитные устройства на основе ВУР перспективны при использовании для защиты больших конденсаторных батарей с большой запасаемой энергией. В этом случае при перенапряжениях подается команда на включение ВУР с высоким быстродействием, который замыкает конденсаторную батарею на линейный резистор. При правильном выборе резистора устраняется вероятность эскалации напряжения в процессе отключения конденсаторной батареи.

Выполняются работы по созданию комбинированных аппаратов и объединению их функций, что дает возможность выбирать простые, высокоэкономичные компоновки подстанций. Такие технические решения обеспечивают уменьшение количества оборудования на подстанции и требуемой для его установки площади и объема, улучшение экологических характеристик. Например, исследуется возможность применения схем подстанций без разъединителей, когда функции разъединителя выполняет элегазовый выключатель [3], проводятся исследования по определению коммутационной способности разъединителей.

Обсуждаются вопросы, связанные с применением новых нелинейных резисторов с высоким гра-

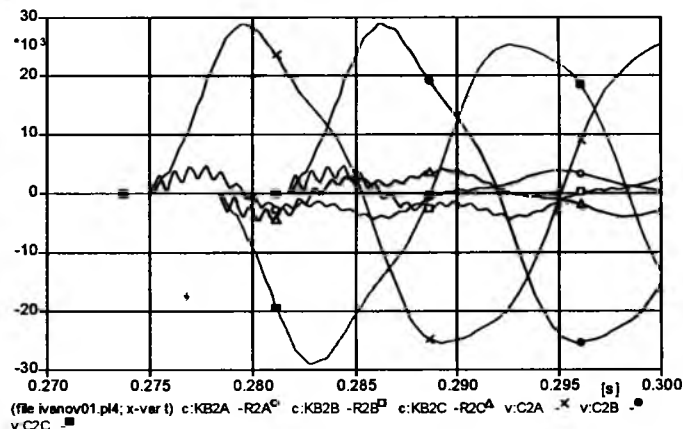


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений при пофазном включении незаряженной БК<sub>2</sub> при включенной БК<sub>1</sub>, когда замыкание контактов Q<sub>2</sub> происходит за 0,1 мс до перехода напряжения через 0 в каждой фазе

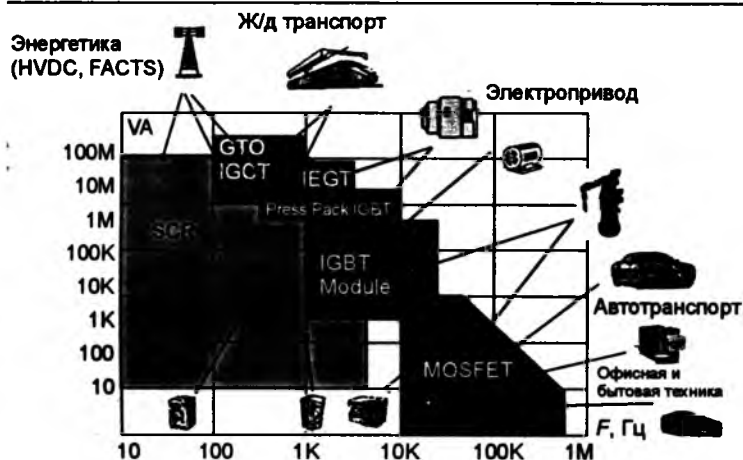
диентом напряжения. Новые ограничители перенапряжений на базе этих резисторов не только имеют меньшие размеры, что особенно важно при использовании их в КРУЭ, но и характеризуются меньшим остающимся напряжением (остающееся напряжение снижено на 5%). Новые ОПН наиболее широко применяются в Японии, где за последние 6 лет установлено более 5000 таких ОПН.

Большое внимание в настоящее время уделяется перспективным измерительным трансформаторам. Нетрадиционные измерительные трансформаторы на базе оптических и электронных систем с цифровым методом обработки сигнала отличаются простотой конструкции, компактностью, хорошо сочетаются с другим оборудованием. Проводятся работы по оптическим измерительным трансформаторам для всех классов напряжения. Традиционные методы регистрации данных с измерительного трансформатора требовали больших значений снимаемого сигнала, что сдерживало широкое применение оптических измерительных трансформаторов. С переходом на цифровую форму измерения и защиты уровень сигнала, снимаемого с оптического трансформатора, становится достаточным, и препятствия для широкого применения таких трансформаторов снимаются. Уже сейчас в Японии в эксплуатации находится около 600 нетрадиционных измерительных трансформаторов на напряжение до 550 кВ, разработан и испытан оптический измерительный трансформатор на напряжение 1100 кВ. Исследуется возможность применения пояса Роговского в системах защиты и управления.

#### Исследовательский комитет В4 "Передачи постоянного тока и силовая электроника"

Одной из важнейших областей работы СИГРЭ является применение мощной преобразовательной техники в электроэнергетике. В последние годы область применения силовой электроники значитель-





**Рис.7. Область применения силовых полупроводниковых приборов**

но распространилась и охватывает практически все сферы деятельности человека: энергетика, промышленность, транспорт, связь, авиация, космос, быт — везде, где необходимо преобразование электроэнергии (рис. 7). В значительной степени это определяется появлением и быстрым развитием полностью управляемых полупроводниковых приборов, позволившим существенно улучшить технико-экономические характеристики преобразовательных устройств, эффективность их применения в различных технологических процессах. Применение силовой электроники в электроэнергетике рассматривается в качестве важнейшего инструмента экономии и эффективного использования электроэнергии, а также повышения управляемости, надёжности и эффективности работы электроэнергетических систем за счёт возможности создания гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока (ГЭП или FACTS). В настоящее время техника ГЭП включает такие устройства как статические компенсаторы реактивной мощности всех видов, регулируемые устройства продольной компенсации, тиристорно-управляемые фазоповоротные устройства, передачи и вставки постоянного тока (в том числе на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах) и т.д.

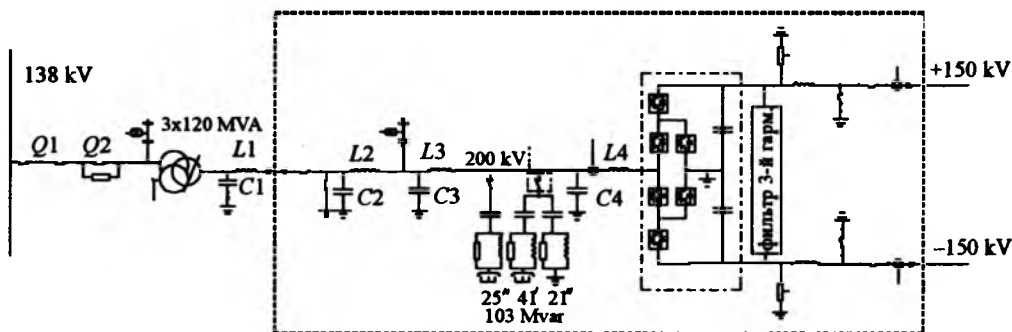
Наиболее ярко прогресс в технологии применения силовой электроники в электроэнергетике прослеживается на примере создания передач постоянного тока на полностью управляемых приборах. Первая такая передача была сооружена в Швеции в 1996 г. и имела мощность 3 МВт. За 6 лет мощность таких пе-

редач возросла почти в 100 раз.

Самая мощная, на сегодняшний день, передача на полностью управляемых приборах – передача "Cross Sound Cable" в США, разработана фирмой АББ. Мощность передачи 330 МВт, напряжение  $\pm 150$  кВ. Кабель длиной 40 км имеет медную жилу сечением 1300 мм<sup>2</sup>. Принципиальная схема передачи представлена на рис.8. Пунктиром выделено оборудование, размещенное в здании. Передача связывает сеть 345 кВ Коннектикута с сетью 138 кВ Лонг Айленда (штат Нью-Йорк). Преобразователи построены по трёхуровневой схеме с вентилями на IGBT. Частота коммутации 1260 Гц

(21-я гармоника). Вентили имеют жидкостное охлаждение. Жидкость – смесь воды и этиленгликоля. Водоохлаждаемый воздушный реактор соединяет преобразователь с шинами 220 кВ переменного тока, к которым подключены фильтры 21-, 41- и 25-й гармоник. На стороне постоянного тока установлен фильтр 3-й гармоники. Передача была пущена в сентябре 2003 г. Надёжность ППТ может быть оценена через коэффициент готовности, который на конец 2003 г. составил 97,5%. Наиболее серьезный аварийный простой длительностью 14,6 ч был связан с повреждением системы управления вентилей на подстанции "Shoreham". Зависимость измеренных потерь в передаче от передаваемой мощности представлена на рис.9. При передаче 330 МВт полные потери составляют 14 МВт, т.е. около 4,2%.

Годом ранее, в сентябре 2002 г., была пущена в эксплуатацию ещё одна мощная передача на полностью управляемых приборах – "Murtagylink" в Австралии, также разработанная фирмой АББ. Мощность передачи 220 МВт, напряжение  $\pm 150$  кВ. Это самая протяжённая кабельная передача. Длина подземного кабеля 177 км. Кабель алюминиевый с сечением жилы 1200 мм<sup>2</sup>. Передача связывает рынки электроэнергии штатов Виктория и Южная Австралия. Схема передачи и параметры очень близки к схеме передачи Кросс Сауд. Преобразователи по-



**Рис.8. Принципиальная схема ППТ Cross Sound (США)**

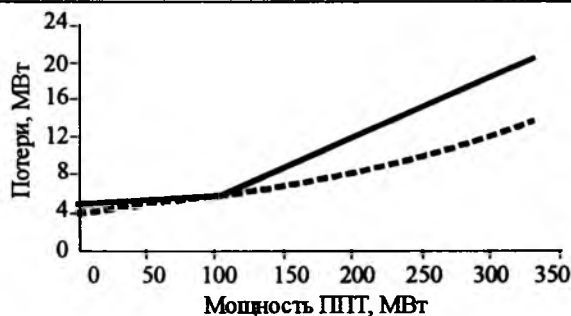


Рис. 9. Зависимость потерь от передаваемой мощности для ППТ "Cross Sound":

— расчёт; - - - - - факт

строены по трёхуровневой схеме с вентилями на IGBT. Частота коммутации 1350 Гц (27-я гармоника). Схемные отличия заключаются в том, что на стороне постоянного тока кроме фильтра 3-й гармоники установлены фильтр 9/21 гармоник и реактор нулевой последовательности.

Применение как одной, так и второй передачи обосновывается следующими преимуществами выбранной технологии:

- регулирование как активной, так и реактивной мощности на преобразовательных подстанциях обеспечивает поддержание напряжения в примыкающих системах;

- мощность может передаваться в любом направлении без каких-либо коммутаций в схеме;

- применяется легкий сухой кабель, для передачи в Австралии особенно важным оказалось, что кабель может легко прокладываться вдоль существующих дорог, а разрешение на такую прокладку у экологических служб может быть получено очень быстро;

- преобразовательные подстанции очень компактные, оборудование располагается внутри легких строений типа складских;

- модульная конструкция оборудования обеспечивает быстрый монтаж и минимальные сроки проведения испытаний и сдачи в эксплуатацию.

Огромный интерес электроэнергетические системы практически на всех континентах мира проявляют к устройствам тиристорно-управляемой продольной компенсации (ТУПК), принципиальная схема которой представлена на рис. 10.

Первая установка ТУПК была разработана фирмой АББ и введена в эксплуатацию в 1997 г. на подстанции

"Stöde" ЛЭП напряжением 400 кВ, как дополнительная часть к неуправляемой установке продольной компенсации, введенной ранее, в 1974 г., для повышения пропускной способности ЛЭП. После введения в эксплуатацию атомной электростанции "Forsmark" в центральном районе Швеции на ней неоднократно наблюдались субсинхронные колебания генераторов 1300 МВт. В результате изучения этих колебаний было принято решение дополнить неуправляемую УПК на подстанции "Stöde" управляемой (ТУПК), основное назначение которой было обеспечить снижение риска возникновения и демпфирование, при возникновении, субсинхронных колебаний генераторов атомной электростанции "Forsmark".

С 1999 г. эксплуатируется установка ТУПК на линии 500 кВ длиной 1020 км между подстанциями "Imperatriz" и "Serra da Mesa", связывающей две мощные энергосистемы Бразилии. На этой ЛЭП установлены шесть установок продольной компенсации, из них пять неуправляемых и одна ТУПК (на подстанции "Imperatriz"). ЛЭП обеспечивает передачу мощности до 1300 МВт в обоих направлениях. Основное назначение установок продольной компенсации — повышение предела статической и динамической устойчивости межсистемной связи, а также подавление низкочастотных колебаний, возникающих вблизи границы устойчивости энергосистем.

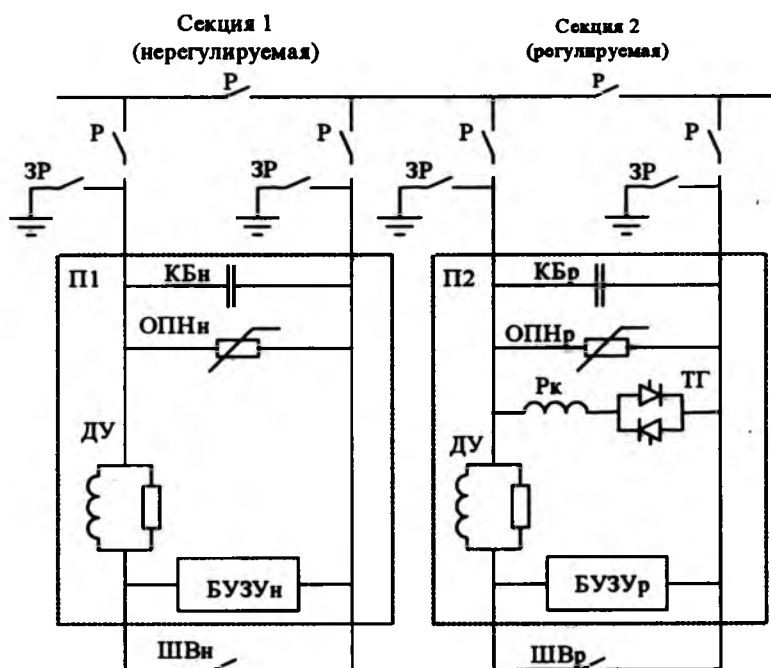


Рис. 10. Принципиальная схема ТУПК:

$P$  — разьединители;  $ЗР$  — заземляющие разьединители;  $П1, П2$  — изолирующие платформы;  $КБн, КБр$  — конденсаторные батареи нерегулируемой и регулируемой секций;  $ОПНн, ОПНр$  — ограничители перенапряжения;  $ТГ$  — тиристорная группа;  $Рк$  — реактор;  $ДУ$  — демпфирующее устройство;  $БУЗУн, БУЗУр$  — быстродействующее управляемое защитное устройство;  $ШВн, ШВр$  — шунтирующий выключатель

### Основные технические характеристики ТУПК подстанции "Imperatriz"

Максимальное рабочее напряжение линии, кВ .....	500
Номинальная реактивная мощность, Мвар .....	107
Номинальный ток, А .....	1500
Номинальное напряжение ТУПК, кВ .....	23,9
Сопротивление КБ, Ом .....	13,3
Номинальная степень компенсации, % .....	5
Регулировочный диапазон изменения степени компенсации, % .....	5–15
Диапазон изменения ёмкостного сопротивления ТУПК, Ом .....	13,3–39,8
Напряжение на ТУПК при номинальной степени компенсации, кВ .....	23,88
Допустимые перегрузки по току:	
2025 А .....	30 мин
3000 А .....	10 с
Максимально допустимый ток КЗ (термическая стойкость), кА .....	23

Целый ряд установок ТУПК эксплуатируется в США, а также в Индии и Китае.

В ВЭИ серьезные исследования в области создания гибких передач переменного тока были начаты в 1996 г., что позволило получить научно-технический задел и обосновать возможность практического создания силами отечественных научно-исследовательских, проектных и промышленных предприятий оборудования для таких передач в России, выразившийся в принятии ОАО "ФСК ЕЭС" в 2003 г. Программы "Создание в Единой энергосистеме России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока и устройств регулирования напряжения". ГУП ВЭИ является одним из основных участников работы по данной программе как разработчик оборудования устройств FACTS.

Новые возможности ППТ и ВПТ на обычных тиристорах открылись при появлении и совершенствовании быстродействующих микропроцессорных систем управления. Традиционные системы управления ППТ и ВПТ, обеспечивающие передачу активной мощности стали дополняться системами:

- регулирования напряжения (реактивной мощности), обеспечивающей поддержание напряжения на шинах каждой из примыкающих систем переменного тока за счёт подключения/отключения силовых фильтров и регулирования углов управления преобразователями;

- регулирования частоты, обеспечивающей модуляцию активной мощности ВПТ при аварийных ситуациях в какой-либо из систем, если частота в этой системе выйдет за заданные пределы;

- контроля и управления перегрузочной способностью, обеспечивающей максимальные возможности ВПТ по мощности в данный момент времени на основе анализа температуры окружающего воздуха, текущей нагрузки, состояния и возможностей резервной системы охлаждения и т.д.

Перспективы улучшения технико-экономических показателей ППТ и ВПТ связаны также и с появлением новых мощных "интеллектуальных" тиристоров, и прежде всего фототиристоров, позволяющим значительно упростить конструкцию высоковольтных вентилялей и увеличить надёжность их работы, в первую очередь за счёт значительного сокращения числа электронных компонентов управления работой тиристоров, расположенных на высоком потенциале. ППТ с вентилями на фототиристорах, разработанные фирмой "Сименс", уже работают в Англии, США, Китае, Индии.

Учитывая существующие планы реконструкции Выборгской подстанции, предусматривающие замену отработавшего свой срок оборудования, ГУП ВЭИ также приступил к разработке новых мощных "интеллектуальных" тиристоров, в том числе и фототиристоров, позволяющих начать разработку и новых типов высоковольтных преобразовательных модулей на их основе, которыми можно будет комплектовать преобразователи Выборгской подстанции и в дальнейшем передачи 1500 кВ постоянного тока, например, для создания линии электропередачи, обеспечивающей передачу мощности в Китай в соответствии с подписанными соглашениями между Россией и Китаем, а также при передаче мощности от Туруханской ГЭС, Мезенской ПЭС и др.

Мировые тенденции исследований и разработок высоковольтного электрооборудования – применение новых электротехнических материалов, анализ переходных процессов, повреждаемости и влияния на окружающую среду, а также диагностика и обслуживание оборудования на месте установки, включая восстановление, ремонт, модернизацию и испытания. Наблюдается также существенное повышение в электроэнергетике роли преобразовательной техники на базе полностью управляемых полупроводниковых приборов. Работы ВЭИ в этих направлениях соответствуют мировому уровню.

#### Список литературы

1. *Electra*. 2003. №193.
2. Hybrid chamber with vacuum and gas interrupters for high voltage circuit-breakers. 2004. Session CIGRE, A3-101.
3. Applications of disconnecting circuit-breakers. 2004. Session CIGRE, A3-201.

## Методы выбора конструкции изоляции для районов с загрязнённой атмосферой

ОСТАПЕНКО Е.И.

*Приведены рекомендации по конструированию и выбору изоляции специальных "грязестойких" изоляторов, разработанные в результате исследований ВЭИ.*

*Deals with presentation of a number of recommendations developed in the course of realisation of the above activity, on selection of insulation and designing it.*

Многообразие климатических условий, в которых эксплуатируется внешняя изоляция линий электропередач и подстанций, приводит к большим трудностям при исследованиях и разработках как конструкций изоляторов, так и предъявляемых к ним требований. В ВЭИ работы в этом направлении проводятся на протяжении свыше 70 лет, в течение которых исследовались механизмы развития разряда, конструкции специальных "грязестойких" изоляторов, изучался характер и интенсивность загрязнённости изоляции в различных районах России и за рубежом.

Результаты исследований загрязнённых изоляторов при длительном воздействии напряжения и при перенапряжениях, проведённые в ВЭИ, легли в основу рекомендаций по выбору конструкций и габаритов аппаратных изоляторов различных классов напряжения.

### Традиционные конструкции фарфоровых и полимерных изоляторов

Установлено, что уменьшение межрёберных расстояний вызывает рост разрядных напряжений практически пропорционально длине пути утечки, пока последняя не достигнет некоторого предела ( $L_0$ ). При дальнейшем увеличении длины пути утечки из-за шунтирования межрёберных промежутков разрядами рост разрядных напряжений приостанавливается. Увеличение длины пути утечки на 20–30% сверх  $L_0$  приводит даже к снижению разрядных напряжений. Таким образом, задача оптимизации конструкции рёбер изоляторов заключается в определении такой длины пути утечки и, соответственно, такого межрёберного расстояния, при котором было бы обеспечено максимальное разрядное напряжение.

На основании разработанных методов расчёта и лабораторных исследований макетов изоляторов были определены оптимальные значения  $L_0$  для изоляторов с простым профилем рёбер, которые ши-

роко используются при изготовлении аппаратной изоляции. Установлено, что область оптимального соотношения между вылетом ребра  $a$  и межрёберным расстоянием  $b$  ( $a/b$ ) находится в пределах 1,1–1,2. Результаты расчёта, а также экспериментальные данные позволяют дать следующие рекомендации по конструированию изоляторов:

1. Для повышения предельных значений  $L_0/H$  и обеспечения наибольшей разрядной напряжённости вдоль загрязнённых аппаратных изоляторов необходимо увеличивать вылет рёбер настолько это возможно по технологическим условиям. При больших вылетах рёбер оптимальным является профиль с переменным вылетом ребра. При конструировании линейных полимерных изоляторов следует учитывать, что чрезмерное увеличение вылета рёбер может снизить разрядную напряжённость вдоль изоляционной поверхности, так как эти изоляторы имеют малый диаметр стержня. Если вылет ребра многократно превосходит радиус стержня, то это приводит к существенному возрастанию токов утечек из-за резкого увеличения среднего диаметра изолятора и неоднородному распределению электрического поля вдоль поверхности.

2. При конструировании грязестойкой изоляции необходимо по возможности уменьшать толщину кромок рёбер. В частности, применение рёбер с толщиной кромок 2 мм позволяет увеличить электрическую прочность изоляции примерно на 10%. Следует отметить, что, если изготовление таких рёбер из фарфора встречает значительные технологические трудности, то для полимерных изоляторов их практически нет. Указанное обстоятельство является одной из причин, определяющих перспективность применения внешней изоляции из полимерных материалов.

3. Оптимальное соотношение между длиной пути утечки и высотой изолятора, обеспечивающее наибольшую электрическую прочность изоляторов при загрязнении, равно примерно 3.

4. При выборе полимерных материалов для внешней изоляции основное внимание должно быть уделено трекингостойкости материала. Существующие методы испытаний на трекингостойкость позволяют достаточно надёжно выбрать из ряда новых материалов лучшие образцы, однако окончательный вывод о пригодности материала может быть сделан на основании его длительных стендовых испытаний и опыта эксплуатации.

Накопленный к настоящему времени опыт позволяет рекомендовать в качестве материала для защитного покрытия композиции на основе кремний-органического эластомера.

5. Надёжная длительная эксплуатация изоляторов, включающих в себя стеклопластик и защитное покрытие, может быть обеспечена лишь при условии прочного соединения покрытия со стеклопластиком. Надёжность соединения определяется правильностью подбора материалов и технологией нанесения защитного покрытия.

6. Для изоляторов в виде стеклопластиковых цилиндров с трекингостойким покрытием, работающих при повышенных давлениях внутри цилиндров, на стадии изготовления необходим контроль газоплотности цилиндра.

7. При конструировании полимерных изоляторов рекомендуется применять ребра клиновидной формы. Должно быть обеспечено условие непробиваемости ребра: в любом сечении электрическая прочность материала ребра на пробой при всех возможных воздействиях с различной формой и амплитудой должна быть выше, чем напряжение перекрытия по поверхности.

Многолетняя практика показывает, что критерием для выбора изоляторов, исходя из условий загрязнения, является длина пути утечки. Поэтому эта величина нормируется во всех существующих стандартах. Эффективность использования длины пути утечки в принятой конструкции изолятора, по нашему мнению, должна подтверждаться лабораторными исследованиями.

Поэтому размеры внешней изоляции должны выбираться из условий обеспечения двух требований:

1) длина пути утечки изолятора должна соответствовать существующим стандартам;

2) изолятор должен выдерживать испытательное напряжение  $U_n$  при нормированной интенсивности загрязнения, испытательное напряжение целесообразно принять равным

$$U_n = K_n U_{н.р.}$$

где  $U_{н.р.}$  – наибольшее рабочее напряжение;  $K_n$  – коэффициент, учитывающий возможность снижения разрядных напряжений в реальных условиях из-за

неравномерности распределения слоя загрязнения, колебания давления или других факторов (толщина слоя загрязнения, химический состав и т.д.), что диктует необходимость повышения испытательного напряжения для обеспечения надёжной эксплуатации оборудования.

При обследовании загрязнённости изоляции в естественных условиях методом счисток в качестве оценки степени загрязнённости рекомендуется брать среднее значение загрязнённости наиболее загрязнённых участков общей площадью 30–40% всей поверхности обследуемого изолятора. При пересчёте лабораторных данных по электрической прочности изоляторов при измеренной степени загрязнения к наибольшим допустимым рабочим напряжениям целесообразно вводить коэффициент запаса 1,5–1,6.

Требуемая надёжность внешней изоляции может быть достигнута введением коэффициентов запаса при нормировании как степени загрязнения, так и значения испытательного напряжения. Важно отметить, что создание необходимого запаса только за счёт одного из коэффициентов не обосновано, так как чрезмерное увеличение испытательного напряжения или степени загрязнения может привести к изменению характера предразрядных процессов, в частности, изменить механизм шунтирования межрёберных промежутков.

Оптимизация составляющих коэффициента запаса проводится уже в течение длительного времени. На первом этапе в РТМ (Руководящих технических материалах) основной запас был вложен в степень загрязнения, а запас по напряжению был равен 10%. В редакции ПУЭ 2003 г. запас по напряжению принят порядка 30%, что, по-видимому, близко к оптимальному, так как перераспределяет запас по напряжению и степени загрязнения приблизительно поровну. Однако и в этом случае испытание при повышенном напряжении для отдельных конструкций может вызвать искажение результатов из-за изменения процессов шунтирования рёбер.

Дальнейший прогресс может быть достигнут нормированием испытаний при неравномерном загрязнении, что позволит получить большее соответствие между нормируемой степенью загрязнения и значением этой характеристики, получаемым при обследовании естественно загрязнённых изоляторов, а также между бросками токов утечки, регистрируемыми приборами при эксплуатации, и токами, наблюдаемыми при лабораторных испытаниях.

За основу для нормирования испытаний при неравномерном загрязнении можно взять упрощённое (например, ступенчатое – 3 или 4 ступени) экстре-

мальное распределение, однако для разработки рабочей методики требуются дальнейшие исследования.

Высота изоляции

$$H = \frac{K_3 U_n}{E_L \frac{L}{H}},$$

где  $E_L$  – 50%-я разрядная напряжённость вдоль поверхности изолятора;  $K_3$  – коэффициент запаса,  $K_3 = 1 + 2,5\sigma$ ;  $\sigma$  – коэффициент вариации с усреднённым значением, равным 0,06.

Разрядная напряжённость  $E_L$  определяется при лабораторных исследованиях внешней изоляции. При разработке новых конструкций предварительная оценка габаритов изоляции проводится, исходя из расчётных значений  $E_L$  или аппроксимацией результатов, полученных ранее на близких по конструкции изоляторах.

Выбранная по рабочему напряжению изоляция должна быть проверена на надёжность работы при воздействии перенапряжений в сочетании с загрязнением и увлажнением поверхности с учётом вероятности появления как перенапряжений, так и загрязнений и увлажнений определённой интенсивности.

### Пространственные изоляционные системы

В последнее время на основе технологических возможностей, появившихся с внедрением полимерных изоляторов, просматривается тенденция создания пространственных изоляционных конструкций и систем, когда вместо традиционных изоляторов в виде оребренных цилиндров применяются сложные трёхмерные изоляционные конструкции и системы. Пространственные системы позволяют наиболее полно реализовать предъявляемые требования при минимальном расходе материалов. При создании вакуумного выключателя напряжением 27–35 кВ реализована конструкция полого опорного изолятора с оребрением как наружной, так и внутренней поверхностей цилиндра, для выключателя нагрузки в виде оребренного сегмента цилиндра. Создан и запатентован также изолятор на напряжение 10 кВ, в котором вместо цилиндрического оконцевателя применена объёмная конфигурация из основного материала изолятора, позволяющая предельно упростить и удешевить стоимость арматуры. Известен вариант опорной изоляции в виде пространственной системы, состоящей из стержневых полимерных изоляторов.

В настоящее время в ряде случаев возникает потребность в увеличении пропускной способности действующих ЛЭП или усилении изоляции из-за неправильного учёта условий загрязнения при про-

ектировании (например, увеличения загрязнённости атмосферы вследствие строительства вблизи трассы ЛЭП промышленных предприятий, интенсивного применения удобрений на полях и т.д.).

Существенный экономический эффект получается, если вместо строительства новых линий перевести существующие ЛЭП переменного тока на линии переменного или постоянного тока повышенного класса напряжения, не делая при этом существенной реконструкции опор.

Как правило, в этих случаях значительные проблемы возникают при обеспечении надёжности изоляции при рабочем напряжении. Применение пространственных изоляционных систем на базе современных полимерных изоляторов открывает возможности для решения таких задач, так как эти системы позволяют получать необходимую электрическую прочность при рабочем напряжении и перенапряжениях независимо друг от друга.

При необходимости усиления изоляции существующих ЛЭП из-за возросших на определённых участках уровней загрязнения или для перевода ЛЭП на более высокий класс напряжения модернизацию промежуточной опоры можно свести к минимуму, если изоляторы пространственных изоляционных конструкций расположить вдоль проводов. В этом случае можно рассматривать применение перевернутого V-образного расположения изоляторов в системе, а для фиксации габарита "провод–опора" можно установить ещё два изолятора с меньшей механической прочностью.

При сохранении габарита воздушного промежутка "провод–траверса" таким же, как в случае обычной поддерживающей гирлянды, при значении угла наклона гирлянд пространственной конструкции 30° по отношению к горизонту, её разрядные напряжения при рабочем напряжении возрастут не менее чем в 2 раза, в то время как механическая нагрузка на каждый изолятор останется прежней. Если учесть, что электрическая прочность загрязнённых изоляторов увеличивается при уменьшении угла их наклона к горизонту, а электрическая прочность полимерных изоляторов за счёт технологических возможностей и гидрофобности материала выше, чем фарфоровых или стеклянных, то можно ожидать ещё большего усиления изоляции в предложенном варианте.

По предварительным оценкам применение пространственных изоляционных систем при модернизации ЛЭП может на 10–15% сократить расходы по сравнению с проведением работ по реконструкции опор.



# Элегазовые коммутационные аппараты номинального напряжения 10 кВ для ячеек КРУ и КСО

БЫКОВЕЦ Ю.Я., ЕГОРОВ В.Г., СЕРЯКОВ К.И., ТОРОПЧИН Ю.В., ЧЕМЕРИС В.С., ГОЕВ А.В.

*Описаны элегазовые аппараты – силовой выключатель и трёхпозиционный выключатель нагрузки (скомбинированный с заземлителем) для установки в КРУ и КСО напряжения 10 кВ, для комплектования компактных подстанций высокой заводской готовности.*

*Circuit – breaker and three position switch which is combined with earthing disconnect switch are presented. They should be used in switchgears 10 kV switchgears for compact city substations of high factory availability.*

Развитие рынка гражданского и промышленного строительства в Москве и московском регионе, как впрочем, и во многих других крупных городах характеризуется рядом специфических требований, предъявляемых как к организации собственно строительства, так и к инженерному обеспечению самого строительства и последующей эксплуатации готового сооружения:

- высокая стоимость земли накладывает отпечаток на весь жизненный цикл здания и его инженерного обеспечения;
- стеснённые условия городского строительства, где часто новостройки вклиниваются в действующую инфраструктуру города;
- сокращение сроков строительства;
- повышенные требования безопасности при эксплуатации зданий и сооружений;
- высокая стоимость строительства, что влечёт за собой повышенные требования к качеству, как самого строительства, так и инженерного обеспечения, связанного с эксплуатацией зданий.

Эти факторы диктуют определённые специфические требования и к энергообеспечению зданий. Высокая удельная мощность энергопотребления на единицу площади требует наращивания мощности энергоснабжающих подстанций, а высокие стоимости земли и строительства требуют снижать площади, занимаемые инженерными сооружениями.

Для решения этой двуединой задачи потребовалось разработать электрооборудование нового поколения, которое бы отвечало современным требованиям эксплуатации.

Нехватка мощностей в городе в связи с ростом энергопотребления, новые требования по энергосбережению – всё это обуславливает отказ от традиционных трансформаторных подстанций и переход на трансформаторно-распределительные подстанции, как наиболее экономичную схему энергоснабжения.

Сокращение сроков строительства и монтажа электроподстанций диктует переход на блочную конструкцию подстанций, которая позволяет основ-

ной объём монтажных и пусконаладочных работ проводить в заводских условиях, но в тоже время ограничивает габариты самих подстанций размерами, обеспечивающими беспрепятственную перевозку в пределах города, а также разгрузку в стеснённых условиях городского строительства.

Таким образом, технологические требования ограничивают габариты блоков размерами 2300×2500×4500 мм. Типовой проект блочной трансформаторной распределительной подстанции (БРТП) 2×1000 кВ·А, включает в себя в распределительной части 12 ячеек типа КСО, что с учётом требований ПУЭ и ПТЭЭП даёт максимальный размер ячейки 1950×650×950 мм.

В конструкции такой ячейки, проработанной в ОАО "МЭЛ", заимствованы многие элементы конструкции классического КРУ. Например, с целью повышения локализационной способности есть конструктивно выделенные отсеки: отсек выключателя, кабельный отсек, отсек шинных присоединений, отсек вторичной коммутации, имеется полный набор блокировок, предусмотренных ПУЭ, МЭК 466, МЭК 694, ячейка комплектуется УЗА типа "Альстом" и "Sepam-1000+". Схемы разработаны с учётом требований подключения устройств телемеханики типа "Деконт-КС" и "Конус".

Сегодня в ОАО "МЭЛ" освоено производство всего схемного ряда данных ячеек, включая и схему АВР по высокой стороне в соответствии с требованиями МКС ОАО "Мосэнерго". При этом конструкция ячейки, несмотря на ограниченные габариты, имеет высокую степень унификации в части использования выключателей от различных производителей, что и позволяет её использовать в различных схемах организации электроснабжения.

Большое внимание при разработке нового оборудования уделяется его безопасной эксплуатации, безопасности обслуживающего персонала. Система блокировок построена таким образом, что ни одно действие, нарушающее технологию работ, не может быть произведено персоналом вне зависимости от вида и характера производимых работ.

Все действия, производимые персоналом, фиксируются на динамической мнемосхеме, которая полностью отражает состояние оборудования в данный конкретный момент времени. Даже при пропадании оперативного питания управляемость ячейкой не теряется, функции временного электроснабжения цепей управления реализованы в конструкции шкафа аварийного питания.

Широкое применение герметизированного элегазового оборудования в распределительных сетях среднего напряжения в полной мере соответствует существующим мировым тенденциям в энергоснабжении потребителей. Востребованность элегазовых коммутационных аппаратов на номинальное напряжение 10 кВ особенно актуальна для сетей с протяжёнными кабельными линиями и для объектов с преобладанием в нагрузке электрических машин. В то же время, отечественные заводы на этот класс напряжения не имеют собственных конструкций элегазовых выключателей и выключателей нагрузки, предназначенных для ячеек КРУ и КСО общепромышленного назначения. Потребности в этом виде продукции обеспечиваются за счёт применения импортного элегазового оборудования.

В ВЭИ им. В.И. Ленина совместно с ОАО "МЭЛ" были разработаны элегазовые коммутационные аппараты на номинальное напряжение 10 кВ – силовой выключатель, разработанный на базе проведённых в ВЭИ исследований по отключению токов до 40 кА при напряжении 10 кВ, и трёхпозиционный выключатель нагрузки. Исходя из требований потребителей, были приняты основные технические характеристики для элегазовых аппаратов, представленные в таблице.

При разработке конструкций элегазовых аппаратов ГУП ВЭИ и ОАО "МЭЛ" исходили из необходимости создания оборудования, не требующего практически какого-либо обслуживания в эксплуатации и обладающего надёжностью в механическом и электрическом отношении при небольших габаритах. В выключателе нагрузки, как это практикуется рядом фирм, фактически совмещены два аппарата – выключатель нагрузки и заземлитель, что позволяет сократить размеры аппаратных отсеков в ячейках КРУ и КСО. Таким образом, выключатель нагрузки является комбинированным аппаратом, выполняющим функции и выключателя нагрузки и заземлителя. Контактная система аппарата может находиться в одном из трёх положений – "включено", "отключено" или "заземлено". Общими конструктивными решениями для силового выключателя и выключателя нагрузки являются: размещение трёх полюсов с дугогасительными устройствами в общем герметизированном изоляционном корпусе и выполнение приводов в виде единого блока, скреплённого с изоляционным корпусом.

Основные технические характеристики элегазовых аппаратов

Параметр	Выключатель	Выключатель нагрузки
Номинальное напряжение, кВ	10	10
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12	12
Номинальный ток, А	630	400
Испытательное напряжение, кВ: относительно земли		
– полного грозового импульса	75	75
– одноминутное промышленной частоты	42	42
– промышленной частоты при плавном подъёме между контактами одного и того же полюса		45
– полного грозового импульса		90
– одноминутное промышленной частоты	42	42
– промышленной частоты при плавном подъёме		45
Номинальный ток отключения, кА	20	0,4
Номинальный ток включения, кА:		
– наибольший пик	51	51
– начальное действующее значение	20	20
Сквозной ток КЗ:		
– наибольший пик (ток электродинамической стойкости), кА	51	51
– действующее значение (ток термической стойкости), кА	20	20
– время протекания, с	3	1
Номинальное избыточное давление элегаза при 20°C, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,4 (4,0)	0,04 (0,4)
Ток отключения ёмкостной нагрузки, А	400	10
Ток отключения ненагруженного трансформатора, А	–	1
Коммутационный ресурс (число отключений) при:		
– номинальном токе отключения	30	200
– токе ёмкостной нагрузки	500	200
– токе ненагруженного трансформатора	500	200
Механический ресурс (число операций ВО)	3000	2000
Номинальное напряжение вторичных цепей и цепей управления, В:		
– постоянного тока	220	–
– переменного тока	220	–
Потребляемый ток элементов привода, управляющих и вспомогательных устройств, не более, А	5	–
Срок службы до списания, не менее, лет	25	25

Силовой выключатель и выключатель нагрузки оснащены пружинными приводами. В разработанной конструкции привода выключателя используются две пружины – пружина, обеспечивающая операцию отключения аппарата, и включающая пружина, энергия которой используется для выполнения одновременно включения выключателя и взведения отключающей пружины. Конструкцией привода предусмотрено взведение включающей пружины от двигателя и вручную, используя для облегчения выполнения операции храповой механизм. Привод выключателя нагрузки – ручного действия, обеспечивает выполнение всех операций трёхпозиционного аппарата: включение – отключение – заземление – разземление. В приводе применена одна пружина, энергия которой используется при выполнении операций включения, отключения и заземления с независимыми от оператора скоростями. Разземление заземлителя осуществляется без применения пружины.

В силовом выключателе и выключателе нагрузки используются способы гашения дуги, не требующие значительных затрат энергии от приводных механизмов. В выключателе применено комбинированное дугогасительное устройство с автогенерацией, в выключателе нагрузки – автогенерирующая камера.

На рис.1 представлен внешний вид силового выключателя, подготовленного для квалификационных испытаний, на рис.2 – опытно-промышленного образца выключателя нагрузки.

Изоляционные корпуса обоих аппаратов изготовлены из литьевого эпоксидного компаунда, который уже длительное время используется зарубежными фирмами для изоляционных корпусов элегазовых аппаратов на номинальные напряжения до 35 кВ. В отливках эпоксидных корпусов заложены закладные детали контактных выводов и для крепления приводов. В верхнем изоляционном корпусе выключате-

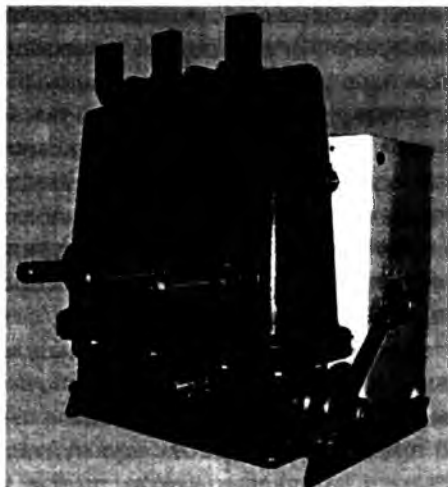


Рис.1. Внешний вид силового выключателя подготовленного для квалификационных испытаний



Рис.2. Внешний вид опытно-промышленного образца элегазового выключателя нагрузки

ля нагрузки предусмотрены также закладные детали для выхода вала аппарата, подшипников и корпусов устройств для заполнения газом и сброса газа, в нижнем изоляционном корпусе – утонение дна, предохраняющее разрушение корпуса при чрезмерном повышении давления в нём. Механическая прочность изоляционных эпоксидных корпусов проверена экспериментально. Разрушающее давление корпусов составляет не менее 6-кратного значения максимального рабочего давления, а срабатывание предохранительных устройств находится на уровне 4-кратного значения этого давления. По технологическому регламенту каждый корпус перед отправкой на сборочный участок подвергается контрольным гидравлическим испытаниям при давлениях, составляющих 3-кратное значение максимального рабочего давления.

Опытно-промышленные образцы выключателя нагрузки и силового выключателя изготовлены в ОАО "МЭЛ". В соответствии с техническими условиями выключатель нагрузки имеет обозначение ВНЭ-10-400/20<sub>3</sub>-УЗ, силовой выключатель – ВЭТ-10-630/20-УЗ. Программы испытаний аппаратов предусматривали проведение основного перечня квалификационных испытаний элегазовых силового выключателя и выключателя нагрузки на установках Испытательного центра ВЭИ им. В.И. Ленина, за исключением испытаний на механическую износостойкость, которые были запланированы на испытательных полях ОАО "МЭЛ". Объем испытаний включал весь комплекс экспериментальных проверок, необходимый для подтверждения технических характеристик каждого аппарата.

Испытания выключателя нагрузки ВНЭ-10-400/20<sub>3</sub>-УЗ были проведены в течение периода конец 2003 г. – начало 2004 г. Аппарат прошёл все испытания, предусмотренные требованиями технических условий ТУ 3414-031-03989649-2004 и стандартов

ГОСТ 17717-79, ГОСТ 8024-90, ГОСТ 1516-96, ГОСТ 15150-69, ГОСТ 12.2.007-75, ГОСТ 12.2.007.3-75: на соответствие сборочному чертежу и безопасность, на механическую износостойкость, электрическую прочность изоляции, нагрев номинальным током, стойкость к сквозным токам, коммутационную способность, устойчивость к климатическим внешним воздействующим факторам. Подтверждена надёжная работа выключателя нагрузки в механическом отношении в нормальных условиях и при предельных температурах, после проведения 2000 циклов "отключено – заземлено – разземлено – включено" рабочая пружина аппарата выдержала 6000 рабочих операций при максимальном нагружении и последующей разгрузке. При нагреве номинальным током температуры перегревов находились в пределах допустимых, несмотря на то, что во время испытаний выключатель нагрузки не заполнялся элегазом. Испытания на стойкость при сквозных токах и включающую способность выключатель нагрузки и заземлитель выдержали при токах, превышающих 20 кА. Электрическая прочность изоляции аппарата при минимальном рабочем давлении элегаза удовлетворяет всем нормируемым требованиям. Отключающая способность выключателя нагрузки подтверждена при всех регламентируемых режимах: при коммутации нагрузочных токов с преобладанием активной и индуктивной нагрузок, зарядных токов кабелей и ненагруженного трансформатора.

Квалификационные испытания выключателя ВЭТ-10-630/20-УЗ проводятся в настоящее время в Испытательном центре ВЭИ им. В.И. Ленина и на заводе ОАО "МЭЛ".

После завершения испытаний на производственной базе ОАО "МЭЛ" планируется организовать серийное производство выключателя нагрузки и силового выключателя. Это позволит комплектовать высоковольтное оборудование полностью отечественными коммутационными элегазовыми аппаратами.

В перспективе следующие этапы работы – развитие коммутационной аппаратуры на напряжение 20 и 35 кВ и номинальные токи до 1600 А – с учётом того, что в Москве появляются объекты, которые запитываются от кабельных линий с напряжением 20 кВ (Москва-Сити, Ходынское поле и др.). На наш взгляд, повсеместный переход на напряжение 20 кВ – это только вопрос времени, техническая и экономическая составляющие этого шага сегодня ни у кого не вызывают сомнения. Необходимо также отметить, что конструкция разработанных коммутационных аппаратов полностью отвечает современным требованиям по надёжности, безопасности эксплуатации, дистанционному обслуживанию и дис-

петчеризации, при этом по своим техническим и эксплуатационным характеристикам они не уступают лучшим зарубежным образцам, что позволит в ближайшее время полностью отказаться от использования импортных коммутационных аппаратов.

Дальнейшие разработки, имеющие целью снижение габаритов высоковольтной аппаратуры, будут направлены на реализацию технических решений, связанных с применением твёрдой изоляции в местах подвода шин, что в конечном итоге позволит создать отечественный аналог моноблочного устройства типа RMU (ring main unit) для кольцевых кабельных сетей. Сегодня уже готово к серийному производству моноблочное устройство на малогабаритных автогазовых выключателях типа ВНР-Д с дистанционным включением.

На базе перечисленного оборудования создан унифицированный ряд комплектных трансформаторных подстанций наружного обслуживания (КТПН) в металлическом корпусе мощностью от 160 до 1000 кВ·А, включая подстанции с воздушным вводом высокого напряжения.

## Выводы

Сокращение сроков строительства и монтажа электроподстанций диктует переход на блочную конструкцию подстанций, которая позволяет основной объём монтажных и пусконаладочных работ проводить в заводских условиях, но в тоже время ограничивает габариты самих подстанций размерами, обеспечивающими беспрепятственную перевозку в пределах города, а также разгрузку в стеснённых условиях городского строительства. Для удовлетворения таких запросов ОАО "МЭЛ" освоил производство схемного ряда ячеек, включая и схему АВР по высокой стороне, в соответствии с требованиями МКС ОАО "Мосэнергo".

Для укомплектования таких ячеек в ВЭИ им. В.И. Ленина были разработаны элегазовые коммутационные аппараты на номинальное напряжение 10 кВ – силовой выключатель и трёхпозиционный выключатель нагрузки (скомбинированный с заземлителем). Исходя из требований потребителей, были приняты основные технические характеристики для элегазовых аппаратов: номинальное напряжение 10 кВ; номинальные токи выключателя нагрузки – 400 А, выключателя – 630 А; сквозной ток короткого замыкания – 20 кА; номинальный ток отключения выключателя – 20 кА. Опытно-промышленные образцы выключателя нагрузки и выключателя изготовлены на ОАО "МЭЛ". Программы испытаний аппаратов предусматривают экспериментальное подтверждение технических характеристик каждого в объёме, предусмотренном типовыми испытаниями.

# Определение эффективности склейки транспонированного провода с целью повышения радиальной устойчивости обмоток трансформаторов при коротком замыкании

ЕЛАГИН В.Н., ЗЕНОВА В.П., КОРОБОВ О.Г., ПАНИБРАТЕЦ А.Н.<sup>1</sup>

*Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований на моделях радиальной устойчивости обмоток из склеенного (при сушке) транспонированного провода с эпоксидным покрытием и из подобного провода без склейки элементарных проводников.*

*Results of comparative experimental researches on models of radial stability of windings from epoxy coating over the enameled rectangular wires which strands are bond together after the thermal treatment of the windings (at drying) and from similar wires which strands aren't bond together (without glueing elementary wires) are given.*

Общеизвестно, что применение транспонированного провода для обмоток трансформаторов позволяет получить минимальные добавочные потери в обмотках (благодаря относительно малым размерам элементарных проводников и их частой транспозиции с шагом около 100 мм), упростить технологию намотки обмоток (благодаря предварительной транспозиции проводников механизированным способом) и тем самым улучшает технико-экономические показатели трансформаторов. Широкое использование транспонированного провода при создании трансформаторов большой и предельной мощности потребовало постановки и проведения специальных исследований радиальной устойчивости обмоток из транспонированного провода при КЗ.

Испытания моделей и трансформаторов с обмотками из транспонированного провода показали, что в большинстве случаев обмотки из транспонированного провода имеют более низкий уровень радиальной устойчивости при КЗ по сравнению с обмотками из обычного и подразделенного проводов. Из анализа экспериментальных результатов следует, что в большинстве случаев коэффициент этого снижения составляет примерно 0,8, а по данным НИЦ ВВА для обмоток из нескольких транспонированных проводов в радиальном направлении значение этого коэффициента может равняться 0,5. По видимому, снижение уровня устойчивости транспонированного провода связано с особенностями его конструкции [1].

Снижение радиальной устойчивости обмоток из транспонированного провода является отрицательным фактором, заставляющим в ряде случаев увеличивать вложение проводникового материала. Для

реализации положительных качеств этого провода необходимо принимать меры, повышающие его радиальную устойчивость. Наиболее перспективными направлениями в этом отношении являются использование электропроводящих материалов с улучшенными механическими характеристиками и склейка элементарных проводников транспонированного провода между собой.

Определение эффективности повышения радиальной устойчивости обмоток из транспонированного провода, элементарные проводники которого склеены между собой по определенной технологии, выполнено по результатам экспериментального исследования на моделях обмоток трансформаторов. Следует отметить, что отечественные трансформаторные заводы применяют транспонированные провода с эпоксидным покрытием элементарных эмалированных проводников, разработанные и поставляемые инофирмами (в частности, Германии, Голландии и Австрии). При соблюдении технологии изготовления обмоток, оговоренной в контракте на поставку проводов, фирмы гарантируют скрепление проводников. По имеющимся у авторов статьи данным технология изготовления обмоток из таких проводов практически одинакова: склейка элементарных проводников происходит при завершающей обработке обмоток под давлением при повышенной температуре.

Сравнительные испытания двух комплектов моделей обмотки трансформатора из непрерывно транспонированного провода с эпоксидным покрытием элементарных проводников на стойкость к сжимающим радиальным усилиям КЗ проведены в специальном устройстве МДУ ("Модель динамических усилий"), разработки ВЭИ им. В.И. Ленина [2]. Модели обмоток комплекта I изготовлены по технологии, предписанной для изготовления реаль-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ под руководством А.И. Лурье и при участии Л.Г. Петровой

ных обмоток трансформаторов из транспонированного провода: модели выполнены со склейкой элементарных проводников (при сушке). При изготовлении моделей комплекта II сушка моделей на завершающей стадии не была проведена, но все другие технологические действия при намотке соответствовали намотке реальных обмоток трансформатора и моделей обмоток комплекта I.

Проведённые исследования кроме проверки эффективности повышения радиальной устойчивости обмоток за счёт склейки элементарных проводников позволили также дополнительно (хотя и не в полной мере) проверить и качество самой склейки.

Для моделей был выбран провод, который предполагалось использовать (и в дальнейшем он был использован) для сжимаемой радиальными силами при КЗ обмотки конкретного мощного автотрансформатора.

Всего было изготовлено и испытано по три модели комплектов I и II.

#### Основные параметры испытанных моделей обмоток

Тип обмотки .....	Непрерывная
Число катушек (по высоте) .....	4
Общее число витков .....	11
Транспонированный провод .....	23 элементарных
..... проводника СТС размером 23/8,0×1,6/1,36 мм	
Размеры провода с изоляцией, мм .....	17,88×23,2
Число параллельных проводов .....	1
Поперечное сечение, мм <sup>2</sup> .....	12,59×23=289,57
Радиальный размер модели, мм .....	70
Диаметры, мм:	
– внутренний .....	1000
– средний .....	1070
– наружный .....	1140
Количество прокладок, шт .....	24
Ширина прокладки, мм .....	50
Осевой размер (без ярмовой изоляции), мм .....	96
Масса провода модели, кг .....	95,33

Кроме этих моделей обмоток, замыкаемых на коротко, были изготовлены используемые при испытаниях для подключения к шинам ударного генератора ТИ-12 две вспомогательные обмотки, одна из которых, запасная, предусмотрена на случай повреждения вспомогательной обмотки при многократном использовании её при испытании.

Предварительно были проведены расчёты магнитного поля и радиальных сил и напряжений по методике РЭСТ (Расчёт электродинамической стойкости трансформаторов) разработки ВЭИ [3]. Поскольку электромагнитные условия, в которых находятся испытываемые модели, несколько отличаются от условий обмоток в реальном трансформаторе, для точного определения по программе РЭСТ осевой составляющей индукции магнитного поля при испытаниях в устройстве МДУ была разработана специальная расчётная модель, учитывающая конструкцию испытательного устройства, в котором ферромагнитный стержень отсутствует, а роль верхней и нижней ферромагнитных границ выполняют нижняя опорная плита и верхняя прессующая плита.

Результаты испытаний комплектов I и II даны в табл. 1, где указаны средние значения напряжений в витках модели при температуре проведения опытов, осевые давления в прокладках. Температура окружающего воздуха при испытаниях – около 14°C. Очередность испытаний моделей: II-1, I-3, I-2, II-3, II-2 и I-1.

Отметим, что при испытаниях модели I комплекта I было проведено подряд 15 опытов, но с разными значениями прессовки, соответственно которым в табл. 1 дана отдельная нумерация опытов. Поскольку в 8-м опыте модель не была доведена до повреждений из-за ограничений технических возможностей испытательной схемы и магнитной системы устройства МДУ, следующие три опыта проведены при осевой прессовке 0,6 МПа (при этом также не было отмечено каких-либо повреждений) и четыре опыта – при отсутствии прессовки модели.

Таблица 1

Результаты испытаний моделей из транспонированного провода

Комплект	Номер модели	Осевое давление, МПа	Среднее напряжение $\sigma_{\text{ср}}$ в опытах, МПа								
			Номер опыта								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
I (склейка)	1	4,08	16	38	46	52	54	58	63	67	–
		0,6	48	57	62	–	–	–	–	–	–
		0	47	50	53*	59*	–	–	–	–	–
	2	0	52	57	58	58*	57*	–	–	–	–
	3	0	23	30	38	44	49	54	59	60*	59**
II (без склейки)	1	4,08	12	18	24	29	35*	–	–	–	–
	2	0	7,8	8,5	14*	–	–	–	–	–	–
	3	0	4	6	8	12**	–	–	–	–	–

\* Отмечено повреждение

\*\* Отмечено сильное повреждение





а)



б)

Рис.1. Характерные деформации потери радиальной устойчивости – прогиб в нескольких пролётах:

а – начальные повреждения; б – большое повреждение



Рис.2. Осевые деформации в пролётах

Некоторые повреждения моделей после испытаний показаны на рис.1 и 2. В большинстве случаев качественно картины повреждения моделей обмоток из несклеенного и склеенного транспонированных проводов, испытанных в одних и тех же условиях, практически одинаковы. Это относится к характерным деформациям потери радиальной устойчивости: – прогиб в нескольких пролётах (рис.1 а и б – начальные повреждения и большое повреждение, соответственно); изгиб в одном пролете. Однако для моделей из склеенного транспонированного провода выявлены и другие повреждения (осевые деформации в пролётах), которые для этого типа провода имеют место из-за повышенной жёсткости на изгиб в радиальном направлении (из-за склейки) – рис.2.

В табл.2 даны значения напряжений начального повреждения, принятые с учётом характера повреждений и изменения механических напряжений от опыта к опыту для всех испытанных моделей, и значения сравнительного коэффициента для определения эффективности рассматриваемой технологии склейки транспонированного провода. Для моделей комплекта II (без склейки) в табл.2 указаны также значения расчётных критических напряжений по [3, 4] для обмоток из транспонированного провода из обычной отечественной меди, приведённые к температуре проведения опытов, для сравнения их со значениями для транспонированного провода иофирмы, из которого были изготовлены модели для данного эксперимента. Важно отметить, что сравниваемые значения близки как для запрессованных моделей, так и моделей, испытанных без запрессовки. Испытания моделей показывают, что радиальную устойчивость обмоток, намотанных из исследуемого провода, следует рассчитывать по применяемой в отечественном трансформаторостроении методике [3, 4] с учётом коэффициента усиления за счёт склейки (при сушке) элементарных проводников или без учёта этого коэффициента, если склейка (при сушке) не была произведена.

Из указанных в табл.2 коэффициентов упрочнения при температуре проведения опыта 14°C следует ориентироваться на коэффициент упрочнения порядка 2,1 (с запасом), так как точность определе-

Таблица 2

К анализу результатов испытаний

Комплект	Осевое давление, МПа	Напряжение начального повреждения (опыт), МПа	Критическое напряжение по [2] (расчёт), МПа	Коэффициент упрочнения за счёт склейки при сушке
I (склейка при сушке)	4,08	Более 67*	–	Более 67 / 32 = 2,1*
	0,60	Более 62*	–	–
	0	(50 + 57 + 59) / 3 = 55	–	55 / 11 = 5,0
II (без склейки)	4,08	32	31,1	–
	0	11	11,0	–

\* Модель при испытаниях не доведена до повреждения

ния этого коэффициента для случая отсутствия опор и осевого давления меньше (возможен большой разброс результатов в зависимости от соотношений геометрических размеров моделей, наличия начальных неправильностей обмоток при намотке, точности фиксации модели в электромагнитном устройстве при испытаниях и т.п.), чем для других условий испытаний. Однако из-за ограниченного числа испытанных моделей, а также учитывая, что были испытаны модели только одного (сравнительно небольшого) диаметра, коэффициент упрочнения при склейке транспонированного провода по рассматриваемой технологии следует принять не более 2,1. Учитывая, что исследования данных моделей при повышенных температурах в данной работе не проводились, а уже имеющийся у нас ограниченный опыт сравнительных испытаний склеенных и несклеенных транспонированных проводов при температуре 20 и 100°C показывает, что коэффициент упрочнения при 100°C может снизиться примерно в 1,2 раза, считаем, что коэффициент упрочнения должен быть принят равным  $2,1/1,2=1,75$ .

После испытаний моделей от них были отрезаны образцы транспонированного провода, по визуальному осмотру которых было установлено следующее:

- модели комплекта I, т.е. склеенные при сушке по технологии изготовления обмоток инофирм, имеют достаточно высокий процентный показатель (коэффициент) склейки проводников;

- модели комплекта II, не подвергавшиеся сушке при изготовлении, не имеют склеенных элементарных проводников, т.е. взаимное слипание проводников до намотки обмотки не произошло.

Процентный показатель (коэффициент) склейки проводников  $K$  ориентировочно был определен как отношение

$$K_{\text{ср}} = [(n-2-n_{\text{отсл}})/(n-2)] \cdot 100 = [1-n_{\text{отсл}}/(n-2)] \cdot 100,$$

где  $n$  – число элементарных проводников транспонированного провода;  $n-2$  – число мест склейки;  $n_{\text{отсл}}$  – число мест некачественной склейки (наличие отслоений, непроклеенности проводов и др.).

Для четырёх из осмотренных срезов коэффициент склейки был равен:

$$[1-2/(23-2)] \cdot 100=90,5\% \text{ (два среза);}$$

$$[1-5/(23-2)] \cdot 100=76,2\%;$$

$$[1-1/(23-2)] \cdot 100=95,2\%;$$

т.е. среднее значение  $K_{\text{ср}} = 88,1\%$ .

## Выводы

1 По результатам сравнительных испытаний моделей обмоток со средним диаметром 1070 мм из непрерывно транспонированного провода со склеивающим эпоксидным покрытием элементарных медных проводников с размерами 1,6×8 достигнут существенный коэффициент упрочнения применительно к радиальной устойчивости обмоток трансформаторов при КЗ за счёт склейки (при сушке) по технологии зарубежных фирм.

2. Более точное значение коэффициента упрочнения за счёт рассмотренного способа склейки при изготовлении обмоток следует корректировать по результатам испытаний моделей с другими геометрическими размерами (размеры провода, средний диаметр, радиальный размер пролеты между прокладками и т.д.), а также по результатам динамических испытаний опытных трансформаторов, обмотки которых изготовлены по данной технологии.

## Список литературы

1. Зенова В.П., Лурье А.И., Мильман Л.И. Исследование устойчивости обмоток трансформаторов из транспонированного провода // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / Под ред. А.И. Лурье. М.: ЗНАК, 2005. С.259–264.

2. Зенова В.П., Коробов О.Г., Лурье С.И. и др. Устройство для испытания прототипов обмоток трансформаторов на устойчивость // Электротехника. 1973. №4.

3. Зенова В.П., Леввцкая Е.И., Лурье А.И. и др. Система программ РЭСТ для расчёта электродинамической стойкости, потерь и нагревов трансформаторов и реакторов // Электротехника. 1996. №8.

4. РД 16.431-88 (РТМ 800.428-77). Трансформаторы силовые. Расчёт электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании.

# Новые системы защиты электротехнического оборудования от перенапряжений и токовых перегрузок

АЛФЁРОВ Д.Ф., БЕЛКИН Г.С., ИВАКИН В.Н., ИВАНОВ В.П., СИДОРОВ В.А.

*В качестве устройств защиты предложено использовать быстродействующие управляемые защитные устройства на основе управляемых вакуумных разрядников, которые способны быстро включаться (единицы микросекунд) и пропускать токи до десятков килоампер. Обсуждается возможность применения устройства для защиты от перенапряжений и токов перегрузки основного оборудования устройства продольной компенсации с тиристорным управлением (ТУПК). Разработана расчётная модель быстродействующего защитного устройства, выбрана схема замещения устройства и её элементов для наиболее тяжёлых режимов работы ТУПК.*

Надёжная работа электротехнического оборудования обеспечивается при условии ограничения электрических воздействий на это оборудование до допустимых значений. В значительной степени эти ограничения обеспечиваются за счёт специальных защитных аппаратов. В настоящей работе для защиты электротехнического оборудования от перенапряжений и токовых перегрузок предложено использовать новое быстродействующее защитное устройство на основе управляемых вакуумных разрядников (РВУ). Применение РВУ позволит существенно улучшить технико-экономические характеристики защитного устройства, поскольку:

- по сравнению с тиратронами они не требуют накала и постоянно готовы к работе, превосходят их по значению импульсного тока;
- по сравнению с игнитронами не требуют термостабилизации, не боятся вибрации, работают при любой ориентации в пространстве и экологически безопасны;
- по сравнению с газоразрядными коммутаторами могут работать в широком диапазоне рабочих напряжений без изменения времени запаздывания включения;
- по сравнению с полупроводниковыми коммутаторами обладают значительно большей мощностью на один элемент, в несколько раз дешевле, обладают большой устойчивостью в аварийных режимах работы.

В ВЭИ разработка РВУ была начата в 80-е годы прошлого столетия. К настоящему времени разработано несколько типов РВУ отпайной конструкции и освоено их мелкосерийное производство. Мощные РВУ российского производства успешно используются в различных высоковольтных импульсных источниках питания во многих странах мира.

*Alongside with traditional ways of protection of power equipment it is offered to use high-speed operated accident protection devices on the basis of triggered vacuum switches, which are capable to switch-on quickly (units of micro seconds) and to pass currents up to tens kA. The opportunity of application of such devices for protection of the basic power equipment of the thyristor controlled series compensation (TCSC) from overvoltages and current overloads is discussed. The calculation model of the high-speed protection device is developed; the equivalent circuit of the device and its elements for the heaviest operating modes TCSC is constructed.*

Принцип действия защитного устройства на основе РВУ рассмотрим на примере его использования для защиты конденсаторной батареи (КБ) и полупроводниковых преобразователей в составе установки продольно-ёмкостной компенсации (УПК), которые уже многие годы используются в энергосистемах для повышения пропускной способности линий электропередачи [1–4].

Функциональные возможности установок продольно-ёмкостной компенсации существенно увеличиваются при использовании тиристорного управления. Устройства продольной компенсации с тиристорным управлением (ТУПК) обладают многими важными привлекательными свойствами для применения в линиях электропередачи [5].

При проектировании таких установок следует учитывать, что УПК и ТУПК весьма чувствительны к токовым перегрузкам и перенапряжениям, возникающим при внешних авариях на линии, а также при внутренних КЗ, поэтому требуют применения специальных мер защиты.

**Защитное оборудование для УПК.** Для защиты от перенапряжений используются быстродействующие устройства, способные ограничить мгновенное напряжение на КБ на допустимом уровне в случае КЗ на линии или при других аварийных условиях в сети. Различные варианты исполнения такого устройства показаны на рис. 1.

Для защиты УПК от грозовых и внутренних перенапряжений применяются защитные разрядники (protective spark gaps) различных типов [1,3,6,7]. Вольт-секундная характеристика (ВСХ) такого разрядника должна идти ниже ВСХ защищаемого объекта. Защитный разрядник шунтирует КБ при перенапряжениях (рис. 1,а). Демпфирующая цепь  $D$  ограничивает амплитуду и обеспечивает необходи-

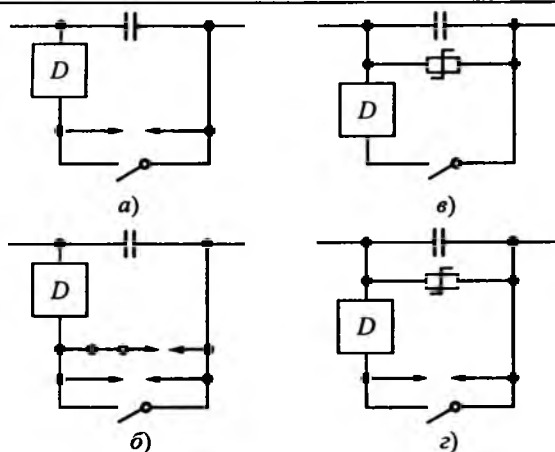


Рис.1 Устройство защиты от перенапряжений:

а – один искровой разрядник; б – два искровых разрядника; в – ОПН; г – ОПН с шунтирующим искровым разрядником; D – демпфирующее устройство

мое затухание разрядного тока УПК. Шунтирующий выключатель предназначен для шунтирования УПК и ввода (вывода) её в работу. В такой схеме обычно применяются неуправляемые защитные разрядники (self-triggered spark gaps), например вентильные разрядники.

Для сокращения времени восстановления разрядника и, соответственно, снижения продолжительности шунтирования КБ, используется схема с более чувствительным дополнительным разрядником (рис. 1, б) и включённым последовательно с ним выключателем, который отключается сразу после ликвидации аварии, тем самым ввода в работу УПК. Использование в качестве дополнительного разрядника управляемого разрядника (forced triggered spark gap) позволит отказаться от применения последовательно включенного выключателя. Эта схема даёт возможность сократить время восстановления работы УПК. Основной защитный разрядник и шунтирующий выключатель служат для резервной защиты.

Однако воздушные искровые промежутки, которые обычно используются в качестве защитных разрядников, имеют значительное время деионизации и большие потери при пропускании разрядного тока. Данное обстоятельство ограничивает срок службы разрядников и затягивает время подключения КБ к линии после завершения аварийного режима. Недостатком таких устройств также является сложность конструкции, разброс пробивных напряжений искровых промежутков (порядка 3–6%) и сравнительно большие значения остающегося напряжения, что ограничивает возможность их использования для защиты КБ от воздействия сквозных токов КЗ.

В последнее время наряду с защитными разрядниками всё более широкое применение находят ограничители перенапряжений (ОПН) без искровых промежутков (рис. 1, в). В качестве активного эле-

мента в них используются новые материалы на основе окиси цинка, имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику (ВАХ).

Современные ОПН разработаны на номинальные напряжения до 1150 кВ. Они обеспечивают ограничение коммутационных перенапряжений до уровня  $1,8 U_{\phi}$ , где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение, и атмосферных перенапряжений до уровня  $2,0 - 2,4 U_{\phi}$ . При снижении перенапряжений с  $2U_{\phi}$  до  $U_{\phi}$  ток, протекающий через резисторы, уменьшается на 6 порядков. Вследствие этого сопровождающий ток, протекающий после срабатывания разрядника, невелик (миллиамперы), и соответственно невелика мощность, выделяющаяся в резисторах. Высокая нелинейность резисторов ОПН (коэффициент нелинейности для области больших токов примерно равен 0,04) приводит к значительному уменьшению длительности импульса тока при его срабатывании от коммутационных перенапряжений.

Максимальное напряжение, которое возникает на КБ, зависит от нелинейности ВАХ ОПН и от значения сверхтока. Поскольку напряжение на ОПН увеличивается с возрастанием тока, максимальный защитный уровень ОПН ( $U_{\text{защ}}$ ) определяется при максимальном сверхтоке через нелинейный резистор в течение аварийного режима.

Уменьшить энергетические требования к ОПН, а следовательно, габариты и стоимость нелинейного резистора, можно посредством шунтирования ОПН с помощью управляемого защитного разрядника (рис. 1, г). Такой разрядник защищает ОПН от перегрузки при внутренней аварии в КБ. Однако и в этом случае ОПН должен выдерживать рассеиваемую в нём энергию при внешней аварии на линии.

Общий подход к защите ТУПК. Благодаря применению в ТУПК управляемых тиристорных вентилей, которые устанавливаются параллельно КБ и могут заменить защитный разрядник с управляемым искровым промежутком, пропускная способность ОПН может быть снижена. Тиристорное управление в ТУПК позволяет уменьшить уровень аварийных токов при КЗ вблизи от установки, так как быстрое отпирание тиристорного вентиля изменяет эффективное сопротивление от ёмкостного до сравнительно небольшого индуктивного значения, что снижает уровень аварийного тока [8,9].

Тиристорный вентиль должен выдерживать приложенное к КБ напряжение в нормальном режиме работы, когда команда на его включение не подаётся. В аварийном режиме тиристоры должны выдерживать воздействие как тока разряда КБ, так и высокочастотной составляющей тока в линии. При отключении вентиля после аварийного режима тиристоры должны выдерживать восстанавливающееся на них напряжение. Отключающая способность тиристоров зависит от поглощённой ими энергии в

течение работы в аварийном режиме, особенно в режиме внешней аварии на линии.

Однако вследствие слабой стойкости к аварийным перегрузкам они требуют собственной системы защиты, что, наряду с относительно высокой стоимостью отдельного элемента, приводит к существенному повышению стоимости вентилля. Кроме того, для ограничения скорости нарастания тока в тиристорах до допустимого уровня последовательно с вентиллем необходимо подсоединять токоограничивающий реактор.

**Вакуумное быстродействующее управляемое защитное устройство.** Альтернативным и более дешёвым способом решения проблемы защиты от перенапряжений и перегрузки оборудования ТУПК является использование вакуумного быстродействующего управляемого защитного устройства (БУЗУ) на основе управляемых вакуумных разрядников (РВУ) [10,11]. Принцип действия такого устройства во многом похож на работу рассмотренного выше тиристорного вентилля, предназначенного для защиты КБ.

БУЗУ (рис.2) состоит из РВУ 1 с блоком запуска 2 и соединённым последовательно с РВУ демпфирующим сопротивлением 3, которое выполняет те же функции, что и в схемах на рис.1. Демпфирующее сопротивление может быть выполнено в виде параллельно соединённых нелинейного сопротивления (ОПН) 4 и линейного сопротивления (Z) 5. Линейное сопротивление может содержать как активную, так и индуктивную составляющие. Включение РВУ осуществляется с помощью блока запуска, который после подачи управляющего импульса выдаёт на управляющий электрод импульс поджига с заданными параметрами напряжения и тока.

БУЗУ подсоединяется параллельно защищаемому оборудованию (КБ и тиристорному вентиллю). Защитный уровень ОПН в предложенной схеме можно выбрать близким к номинальному напряжению на оборудовании ТУПК ( $U_{защ} < KU_{ф}$ ,  $1 < K < 1,8$ ). В результате рассеиваемая в ОПН энергия при протекании разрядного тока будет существенно меньше, чем в схеме его подключения без РВУ.

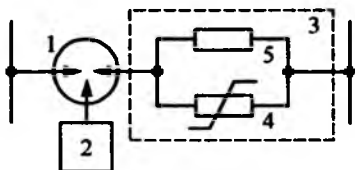


Рис.2. Структурная схема БУЗУ:

1 – РВУ; 2 – блок запуска; 3 – демпфирующее устройство; 4 – нелинейное сопротивление; 5 – линейное сопротивление

Параллельное соединение с нелинейным сопротивлением линейного сопротивления также позволяет уменьшить выделяемую в нелинейном сопротивлении энергию. Значение линейного сопротивления Z выбирается на основе критерия оптимального распределения энергии, поглощаемой в ОПН и сопротивлении Z, из соотношения:

$$U_{пер}/I_{пер} > Z > U_{защ}/I_{макс},$$

где  $I_{макс}$  – ток через ОПН при  $U = U_{защ}$ ;  $I_{пер}$  – значение тока в ОПН, при котором его ВАХ переходит из области проводимости в область сопровождающего тока;  $U_{пер}$  – напряжение на ОПН при  $I = I_{пер} = 1 \div 20$  мА.

Указанное соотношение определяет диапазон значений линейного сопротивления. Оптимальное значение Z выбирается из этого диапазона на основе инженерного расчёта. Задачей этого расчёта является выбор такого линейного сопротивления, чтобы большая часть энергии поглощалась в нём, и в тоже время, чтобы это сопротивление имело приемлемые габаритные и стоимостные показатели.

**Расчёты аварийных режимов в ТУПК.** Расчёты аварийных режимов были выполнены применительно к работе ТУПК в схеме двухцепной линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 220 кВ длиной 200 км. В конце линии была подключена нагрузка  $Z_n = 100$  Ом. Рассчитаны наиболее тяжёлые аварийные режимы по току и напряжению при трёхфазном КЗ на ЛЭП в непосредственной близости от ТУПК. Параметры ТУПК с коэффициентом компенсации линии  $K_x = 0,5$  были приняты: ёмкость  $C_{тупк} = 156$  мкФ, сопротивление  $R_{тупк} = 1,25$  Ом, индуктивность  $L_{тупк} = 4$  мГн. Численное моделирование выполнялось в следующей последовательности по времени:

- 0 – 0,1 с – выход на установившийся режим;
- 0,1 – 0,3 с – трёхфазное КЗ на землю;
- 0,3 – отключение КЗ концевыми выключателями.

Защита КБ от кратковременных перенапряжений (коммутационных и перенапряжений, возникающих при грозовых воздействиях) осуществлялась подключённым параллельно ей основным нелинейным резистором (ОПН). Для снижения выделяемой в ОПН энергии при длительных перенапряжениях, возникающих при КЗ, и для защиты тиристорного вентилля от бросков тока в них параллельно ТУПК в каждой фазе подключается БУЗУ. Вакуумный управляемый разрядник имитируется трёхфазным выключателем с управлением по напряжению.

Принципиальная схема замещения ТУПК, используемая в расчётной модели ЛЭП, показана на рис.3. Здесь основной ОПН обозначен как ОПН1, РВУ – как TVS, демпфирующее сопротивление – как цепочка из параллельно соединённых нелинейного сопротивления ОПН2 и линейного сопротивления Z, а шунтирующий выключатель как – SW. Защитный уровень ОПН в предложенной схеме выбран близ-

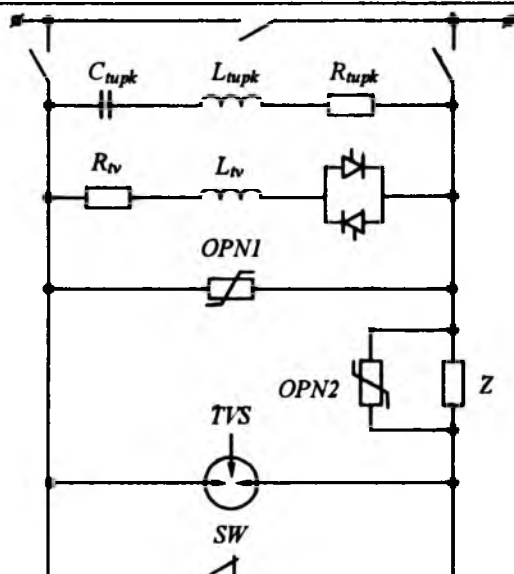


Рис.3. Принципиальная однолинейная схема ТУПК с защитным устройством

ким к номинальному напряжению на оборудовании ТУПК, т. е. коэффициент кратности перенапряжений  $K = 2$ . За основу брался ОПН, состоящий из набора шайб с ВАХ

$$U/U_{500} = 0,775 I^{0,04} + 1,4 \cdot 10^{-5} I,$$

где  $U$  – напряжение на нелинейном резисторе;  $U_{500}$  – напряжение на нелинейном резисторе при токе 500 А;  $I$  – протекающий через нелинейный резистор ток.

Первоначально был рассмотрен режим максимальной компенсации, т. е. когда с тиристорного вентилля полностью снято управление. В результате расчётов, выполненных без подключения БУЗУ, было установлено, что при возникновении КЗ установка ОПН параллельно КБ позволяет лишь снизить напряжение на ТУПК до 120 кВ. При этом в ОПН выделяется значительная энергия (10 МДж), а ток в КБ снижается незначительно и составляет 8300 А.

Результаты расчёта при подключении БУЗУ показаны на рис.4, 5. РВУ включались по достижении токами в основном ОПН (ОПН1) 500 А с задержкой не более 10 мкс. Последовательно с РВУ подключался резистор  $Z = 10$  Ом. Шунтирующий выключатель в работу не вводился. Из результатов расчёта следует, что с помощью БУЗУ удастся:

1. Защитить КБ не только от перенапряжений, снизив его до двукратного, но и от превышения тока в ней, причём двукратный уровень перенапряжения длится всего 1–2 полупериода в отличие от случая, когда для защиты применялся бы только ОПН. Всё остальное время напряжение на КБ поддерживается практически на номинальном уровне. То же самое относится к значениям тока в КБ. При этом первоначальный бросок тока в РВУ достигает 8 кА, а установившееся значение около 3 кА.

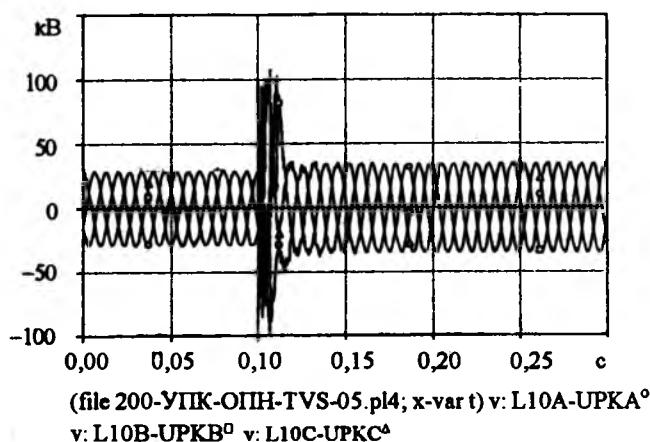


Рис.4. Напряжение на КБ применительно к ЛЭП длиной 200 км и ТУПК с  $K_x = 0,5$  при шунтировании ОПН вакуумным управляемым разрядником

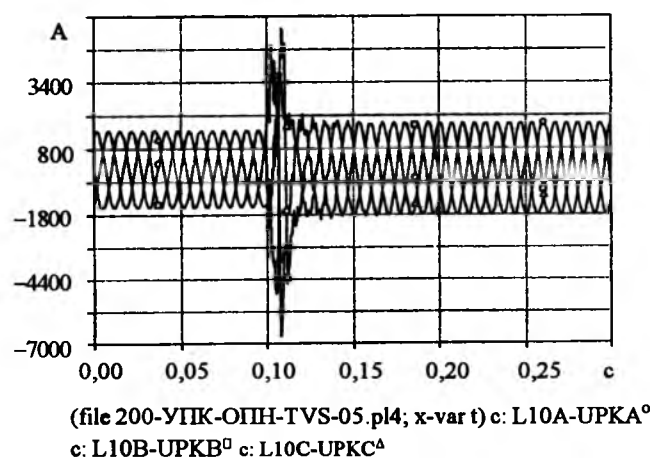


Рис.5. Ток в КБ применительно к ЛЭП длиной 200 км и ТУПК с  $K_x = 0,5$  при шунтировании ОПН вакуумным управляемым разрядником

2. На порядки снизить выделяемую в основном ОПН энергию. Параллельное соединение с линейным сопротивлением  $Z$  нелинейного сопротивления ОПН2 позволяет ещё больше уменьшить выделяемую в основном ОПН энергию. Оптимальные значения линейного и нелинейного сопротивлений должны выбираться для конкретного ТУПК на основе критерия оптимального распределения энергии, поглощаемой в ОПН1, ОПН2 и сопротивлении  $Z$ .

Включение шунтирующего выключателя через 0,1 с после возникновения КЗ облегчает работу РВУ из-за уменьшения длительности протекающего через него тока.

Расчёты в режиме шунтирования КБ тиристорным вентилем с соединённым с ним последовательно реактором, имеющим  $R_{tv} = 0,1$  Ом и  $L_{tv} = 10$  мГн (рис.3), проводились при минимальной компенсации, т. е. когда тиристорный вентиль полностью открыт. РВУ включались по достижении тока в тири-



сторном вентиле 3000–4000 А в каждой фазе с задержкой не более 10 мкс. Последовательно с РВУ включался линейный резистор  $Z = 1 \div 10$  Ом.

Из расчётов следует, что подбором линейного сопротивления  $Z$  можно в аварийном режиме уменьшить установившийся ток в тиристорном вентиле от 4000 А до номинального значения 1750 А. При этом ток в РВУ будет составлять несколько килоампер.

**Управляемые вакуумные разрядники.** РВУ представляют собой безнакальные трёхэлектродные герметизированные приборы с давлением остаточных газов, не превышающим  $10^{-4}$  Па. Включение разрядника осуществляется подачей пускового импульса напряжения на управляющий электрод. Время включения обычно не превышает 1–2 мкс и практически не зависит от напряжения на основных электродах.

В отличие от газонаполненных разрядников РВУ способен надёжно включаться в широком диапазоне рабочих напряжений (0,1–50 кВ) и длительно (миллисекунды) пропускать импульсный ток (0,1–300 кА). Во включённом состоянии падение напряжения на РВУ составляет 50–100 В, что определяет сравнительно низкий уровень рассеиваемой в разряднике энергии при коммутации больших токов. Выключение РВУ, так же как и тиристора, происходит при переходе тока через ноль.

Вакуумные коммутирующие устройства сравнимы по электрической прочности с газовыми разрядниками высокого давления. Однако они обладают более высокой скоростью восстановления электрической прочности и имеют значительно меньший межэлектродный зазор, что позволяет существенно уменьшить габариты устройства.

По сравнению с тиристорными вентилями РВУ обладают значительно большей мощностью на один элемент, в несколько раз дешевле, способны выдерживать значительные перегрузки по току и напряжению и, следовательно, не требуют дополнительных мер защиты.

Согласно сказанному, для применения в защитных устройствах РВУ должен выдерживать напряжение, определяемое защитным уровнем основного ОПН, и обеспечить многократное пропускание тока с амплитудой десятки килоампер.

В ВЭИ разработаны и освоено производство нескольких типов РВУ, предназначенных для коммутации мощных ёмкостных накопителей энергии в электрофизических установках, а также для электроразрядных и магнитно-импульсных технологий [12]. Многие из этих разрядников по испытательным напряжениям соответствуют классу напряжений 10 кВ. В настоящее время ведётся разработка высоковольтного РВУ на класс напряжения 35 кВ.

Так, в результате исследований электрической прочности РВУ после коммутаций полуволны тока

промышленной частоты с амплитудой 4000 А была определена зависимость напряжений пробоя  $U_F$  внутренней изоляции разрядника от межэлектродного зазора  $d$  при вероятностях пробоя  $F1 = 0,01$  и  $F2 = 0,001$  [13]. Эти зависимости удовлетворительно аппроксимируются выражениями:

$$U_{F1} = 13,9 d^{0,63},$$

$$U_{F2} = 7,8 d^{0,75}.$$

Отсюда следует, что РВУ с зазором  $d = 20 \div 25$  мм может использоваться в сетях промышленной частоты при рабочем напряжении до 60 кВ в защитных устройствах от сверхтоков и перенапряжений.

Для защитных устройств более высокого класса напряжения используется последовательное соединение нескольких РВУ. Разработанные в ВЭИ методики расчёта и испытаний позволили создать новые типы быстродействующих многоразрывных управляемых коммутационных устройств на основе РВУ [14–16].

Возможность использования РВУ в схеме УПК для ограничения токов КЗ на линии рассмотрена в [17]. Проведенные в этой работе эксперименты продемонстрировали эффективность применения РВУ в схемах быстродействующих управляемых защитных устройств.

Отметим, что весьма перспективным представляется применение РВУ в схемах защиты от импульсных коммутационных перенапряжений и в мощных низковольтных электрофизических установках [18]. В этом случае последовательно с РВУ соединяется только нелинейное сопротивление ОПН с малым уровнем ограничения перенапряжений  $U_{\text{защ}} < 1,8 U_m$ , где  $U_m$  – напряжение источника питания. Такое устройство способно отключать сопровождающий ток ОПН на уровне нескольких ампер, что ограничивает уровень рассеиваемой в нём энергии и, тем самым, позволяет существенно уменьшить габариты защитного устройства.

Проведённый анализ и испытания показали высокую эффективность новой системы защиты, которая может применяться не только в установках продольной компенсации, но и для защиты другого электротехнического оборудования.

#### Список литературы

1. Мельников М.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330–500 кВ. М.: Энергия, 1974.
2. Андреев В.Д., Бугаев Ф.И. Статические компенсаторы реактивной мощности // Электротехническая промышленность. Сер. 04. 1987. Вып. 1(2). С. 1–32.
3. Ивакин В.Н., Сысоева Н.Г., Худяков В.В. Электроразрядники и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1993.
4. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2000.

5. Series compensation – a powerful tool for efficiency in power transmission. ABB Utilities AB // www.abb.com/FACTS.

6. Series capacitors for power system, Part 2: Protective equipment for series capacitor banks. IEC 143-2: 1994.

7. Чунин А.А., Жаворонок М.А. Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985.

8. CIGRE – W/G 14. 18-SC14 Draft: 12/96.

9. Kirsch OPHr L., Bohn J., Sadek K. Thyristor protected series capacitor: design aspects // VII Int. Conf. on AC-DC Power Transmission, 2001. P. 138–144.

10. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Будовский А.И. и др. Применение быстродействующих управляемых коммутирующих устройств в электроэнергетике // Электричество. 1998. №7. С. 2–8.

11. Alferov D.F., Belkin G.S., Budovsky A.I. et al. New types of triggered vacuum switching devices for fast synchronized load commutation // SIGRE Rep. 1998. №13-108.

12. Алферов Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Управляемые вакуумные разрядники: основные свойства и применение // ЭЛЕКТРО. 2002. №2. С.31–37.

13. Сидоров В.А., Алферов Д.Ф., Козмиди П.К. Исследование электрической прочности управляемых вакуумных разрядников // Сборник научных трудов МИФИ. 2006. Т. 8. С. 57–58.

14. Sidorov V.A., Alferov D.F. Dielectric Strength of Series-connected Triggered Vacuum Switches // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2003. Vol. 10, №4. P. 596–603.

15. Алферов Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А., Хабаров Д.А. Высоковольтное быстродействующее шунтирующее устройство // Электротехника. 2003. №11. С.60–64.

16. Сидоров В.А., Алферов Д.Ф., Алферова Е.Д. Статистическое описание электрической прочности последовательно соединенных одинаковых изоляционных элементов // Электричество. 2005. №2. С.10–17.

17. Shi Jing, Zou Jiyan, He Junjia, Sun Fujie. Preliminary research on triggered vacuum switch based fault current limiter // Proc. of XIX -th ISDEIV, Xi'an. 2000. P. 507–510.

18. Алферов Д.Ф., Аталиков М.М., Кокоулин А.И. и др. Блок защиты, обеспечивающий ограничение импульсных перенапряжений на более низком уровне по сравнению с традиционными ограничителями перенапряжений // VIII Симпозиум "Электротехника 2010". Доклад 2.07, 2005.

## Влияние химического состава добавок на свойства варисторов на основе оксида цинка

АЛМАЗОВ В.А., ЛЮЦАРЕВА Л.А., ПЛАТОВА Е.С., ЛЮБИМОВА В.А., ПОПОВА Н.А.

*Изучено влияние оксидов висмута, кобальта, марганца, титана, олова при введении в оксид цинка на спекание и электрофизические свойства варисторов. Показана возможность регулирования свойств варисторов с помощью химического состава.*

*In this work studied the influence oxides Bi, Co, Mn, Ti, Sn in oxide zinc on sintering and electrofysical properties of varistors. The carried out research has confirmed the possibility of regulation properties of varistors.*

Варисторы на основе оксида цинка являются многокомпонентными материалами [1,2]. Свойства варисторов, определяющие область их применения, зависят от химического состава и концентрации добавок, вводимых в оксид цинка.

В данной работе изучалось влияние на спекание и электрофизические свойства варисторов разных сочетаний добавок оксидов висмута, кобальта, марганца, титана, олова, вводимых в оксид цинка.

В качестве основного компонента использовался оксид цинка марки "чда" с размером частиц не более 2 мкм, содержащий 20–25% рентгеноаморфной фазы с размером частиц менее 1 мкм. Концентрация оксида цинка в материалах изменялась от 91,30 до 94,52% масс.

В табл.1 перечислены сочетания добавок, которые вводились в изучаемые материалы. Добавки оксидов вводились путём смешивания в шаровой мельнице с оксидом цинка и пластифицирующей

добавкой в среде этилового спирта и мелющими телами на основе оксида циркония [3].

После смешивания и удаления этилового спирта из полученных смесей порошков прессовались диски диаметром 40,7 мм, толщиной 5–6 мм при удельном давлении 1000 кг/см<sup>2</sup>. Отпрессованные образцы спекались при температурах 1100, 1200°C в воздушной среде. Характеристики материалов после спекания приведены в табл.2.

Из табл.2 видно, что наибольшая плотность (кажущаяся) материалов получена при спекании при 1100°C. Увеличение температуры спекания до 1200°C приводит к снижению плотности, т.е. к разрыхлению материалов 2–5, при этом одновременно происходит увеличение потерь массы, что, очевидно, является основной причиной уменьшения плотности, так как усадка при этом остаётся практически неизменной. Наибольшее значение плотности (кажущейся) 5,40 г/см<sup>3</sup> достигается при введении

Таблица 1

## Химический состав материалов

Шифр материала	Вводимые добавки	Концентрация добавок, %
2	Оксид висмута	5,48
3	Оксиды висмута и кобальта	6,33
4	Оксиды висмута, кобальта, марганца	6,88
5	Оксиды висмута, кобальта, марганца, титана	7,82
6	Оксиды висмута, кобальта, марганца, титана, олова	8,70

совместно оксидов висмута и кобальта. Введение добавок в материалы 4–6 вызывает постепенное снижение значений плотности.

Микроструктура материала изучалась с помощью петрографического исследования. Было показано, что микроструктура образцов после спекания представлена матрицей, состоящей из кристаллов оксида цинка с незначительной внутрикристаллической пористостью. По границам кристаллов оксида цинка образуются бинарные твёрдые растворы с оксидом висмута кубической и моноклинной форм.

Между кристаллами оксида цинка в процессе спекания образуется расплав, который при охлаждении частично или полностью кристаллизуется, образуя различные кристаллические фазы. Результаты петрографического анализа приведены в табл.3, откуда следует, что после спекания при 1100°C все материалы имеют близкие размеры кристаллов оксида цинка в пределах 14–30 мкм. Увеличение температуры спекания на 100°C вызывает значительный рост кристаллов, максимальный размер кристаллов 50–100 мкм в зависимости от химического состава материала. При этом наибольшее увеличение размеров кристаллов оксида цинка наблюдается у материалов 3,4, т.е оксиды кобальта и марганца ускоряют рост кристаллов. У материалов 5,6 скорость

роста кристаллов оксида цинка меньше, т.е. введение в четырехкомпонентный материал оксида титана одного или в сочетании с оксидом олова приводит к замедлению роста кристаллов.

Как отмечалось, между оксидами цинка и висмута образуются твёрдые растворы, при этом моноклинный раствор наблюдается при более низкой температуре, чем кубический (табл.3) за исключением материала 6, из чего можно предположить, что оксид олова снижает температуру образования кубического твёрдого раствора.

На образование внутрикристаллических пор также влияет химический состав материала. Концентрация пор уменьшается при увеличении количества добавок, введённых в оксид цинка. В материалах 5, 6 пористость практически отсутствует, наблюдаются лишь единичные поры, что, возможно, связано с уменьшением скорости роста кристаллов оксида цинка.

Таким образом, видно, что на микроструктуру варисторов на основе оксида цинка, формируемую в процессе спекания, влияет химическая природа вводимых добавок, а также их сочетание.

Были изучены электрофизические свойства материалов: определены вольт-амперные характеристики (ВАХ), рассчитан коэффициент нелинейности ВАХ для различных интервалов тока, определено остающееся напряжение в импульсном режиме при различных значениях тока. Результаты определений приведены в табл.4. Для исключения влияния толщины образца напряжения приведены в вольтах на миллиметр.

Сравнение напряжённости при одном и том же токе показывает, что у всех материалов наблюдается снижение напряжённости с ростом температуры спекания. При этом отношение напряжённостей при токах 10 и 20 мА приближается к единице. Остающееся напряжение при импульсных токах так же снижается с ростом температуры спекания: наименьшие значения получены у материалов 3 и 5.

Коэффициент нелинейности материалов возрастает

Таблица 2

## Характеристики материалов после спекания

Шифр материала	Плотность сырца, г/см <sup>3</sup>	Температура спекания, °C	Плотность (кажущаяся) после спекания, г/см <sup>3</sup>	Линейная усадка, %	Потери массы при спекании, %	Диаметр образцов после спекания, см
2	3,37	1100	5,34	14,5	2	3,48
		1200	5,22	14,7	4	3,47
3	3,34	1100	5,40	15,0	2	3,46
		1200	5,33	15,7	3	3,43
4	3,36	1100	5,38	15,0	2	3,46
		1200	5,23	15,2	3	3,45
5	3,31	1100	5,36	15,2	2	3,45
		1200	5,20	15,2	3	3,45
6	3,28	1100	5,35	14,7	2	3,47
		1200	5,36	15,2	2	3,45

Таблица 3

## Результаты петрографического анализа исследуемых материалов

Шифр материала	Температура спекания, °С	Размер кристаллов ZnO, мкм	Концентрация твёрдых растворов ZnO-Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % об.		Характеристика прослоек аморфных фаз		Характеристика прослоек кристаллических фаз		Характеристика внутрикристаллической пористости	
			Моноклинная форма	Кубическая форма	Размер, мкм	Концентрация, % об.	Размер, мкм	Концентрация, % об.	Размер, мкм	Концентрация, % об.
2	1200	30–60	3	Нет	1–2	1	Нет	–	2–6	5
3	1100	20–24	3	Нет	2	2	<1	2	6–4	1
3	1200	35–70	3–4	5	4–5	3	<1	Единичные	5–6	2
4	1100	20–24	1–2	Единичные	2	4–5	1	1	2–4	2
4	1200	24–100	4	4	Нет	–	<1	4–5	4–5	<1
5	1100	14–30	5–6	1	2	5	Нет	–	4–5	Единичные
5	1200	20–50	1	4–5	<1	71	2–3	5	4–5	Единичные
6	1100	16–20	3–4	4–5	2	4	1–2	4	3–4	Единичные
6	1200	16–50	2	4–5	Нет	–	2–3	5	2–3	Единичные

Таблица 4

## Электрофизические свойства материалов

Шифр материала	Температура спекания, °С	Напряжённость, В/мм, при токе					Коэффициент нелинейности ВАХ $\alpha$ в интервале токов		Остающееся напряжение, В/мм, при токе, А				
		10мкА	100мкА	1мА	10мА	20мА	1мА–100мкА	10мА–1мА	400	600	800	1000	200
2	1100	22	40	57	75	82	6	8	150	170	190	200	217
2	1200	21	33	47	62	64	7	10	115	145	160	165	170
3	1100	15	20	35	53	58	4	6	85	125	135	140	145
3	1200	9	16	29	40	45	4	7	50	75	90	95	100
4	1100	14	32	56	75	80	4	8	135	140	150	157	170
4	1200	10	22	46	58	63	1	10	110	130	140	145	152
5	1100	12	24	37	45	46	5	9	70	97	115	122	130
5	1200	11	22	28	32	34	12	18	58	82	95	102	105
6	1100	39	49	62	75	78	10	13	155	160	170	175	181
6	1200	21	42	52	55	56	11	40	95	110	120	125	130

тает с ростом температуры спекания, что, возможно, объясняется ростом кристаллов оксида цинка. У материалов 2–4  $\alpha$  имеют близкие значения (табл.4), добавление в материал 4 оксидов титана и олова увеличивает коэффициент нелинейности в 2–4 раза, что снижает влияние пульсаций напряжения, увеличивает стабильность падения напряжения на нагрузочном сопротивлении, параллельно которому подключен варистор [1].

Из изложенного следует, что для изготовления варисторов предпочтительнее материал 5, так как он обладает большей нелинейностью по сравнению с материалом 3.

Таким образом, в результате проведённых исследова-

ний показаны возможные изменения электрофизических свойств с помощью варьирования химического состава материалов варисторов. Выбор материала для изготовления варисторов определяется конкретными рабочими условиями эксплуатации изделия, в состав которого включены варисторы.

## Список литературы

1. Валеев Х.С., Квасков В.Б. Нелинейные металлооксидные полупроводники. М., 1983.
2. Qing X.U. // Journal of Wuhan University of Technology. 2001. Vol.16, №1. P.5–9.
3. Алмазов В.А., Комаров А.Н., Люцарева Л.А. и др. // Прикладная физика. 2001. №4. С.118–121.

## Особенности испытаний вакуумных выключателей током короткого замыкания

ПЕРЦЕВ А.А., ПЕТЕРСОН А.Л., РЫЛЬСКАЯ Л.А.

*Излагаются рекомендации по повышению достоверности сертификационных испытаний высоковольтных вакуумных выключателей. Рекомендуются меры по выявлению полного числа повторных пробоев при коммутационных испытаниях и способ испытаний выключателей на стойкость к сквозным токам КЗ, исключающий принятие ошибочного заключения.*

Вакуумные выключатели обладают рядом известных ценнейших качеств, таких как большая коммутационная способность, высокая износостойкость, стабильность электрического сопротивления контактов, полная экологическая чистота, малые затраты на обслуживание, высокая надёжность, взрыво- и пожаробезопасность. Кроме того, основные коммутирующие элементы выключателей – вакуумные дугогасительные камеры (камеры) – выпускаются на специальных заводах по приемлемым ценам и доступны широкому кругу потребителей. Изготовление этих выключателей не требует сложного и громоздкого оборудования. Эти обстоятельства и относительная простота конструкции привлекают к изготовлению выключателей энтузиастов, зачастую не знакомых с особенностями этих аппаратов, обусловленных работой силовых контактов камер в вакууме. При выпуске этих аппаратов на рынок изготовители обычно полагаются на положительные результаты испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 687-78, который, однако, не учитывает некоторых особенностей вакуумных выключателей. Поэтому результаты испытаний по ГОСТ 687-78 ещё не могут дать однозначного исчерпывающего ответа о качестве аппарата.

Цель настоящей статьи обратить внимание изготовителей и испытателей вакуумных выключателей на необходимость учитывать их специфику при формировании программы испытаний.

**Повторные пробои.** Одна из особенностей, проявляющихся при коммутационных испытаниях вакуумных выключателей на номинальное напряжение 10 кВ и более состоит в возможности возникновения повторных пробоев (ПП). Согласно [1] ПП характеризуются возобновлением тока между контактами камеры в процессе операции отключения после того, как ток оставался равным нулю в течение времени, равного или большего  $1/4$  периода промышленной частоты.

Закономерности возникновения ПП были тщательно изучены. Лидирующая роль в этом принадлежит исследователям – сотрудникам ГУП ВЭИ, опубликовавшим цикл работ в отечественных и за-

*The article gives the recommendations concerning improvement of HV circuit-breakers certification tests accuracy based on VEI researches. The article discloses the measures allowing to determine the total number of restrikes occurring in switching tests and the method of testing circuit-breakers for short-circuit steady-leakage current resistance, which eliminates the probability of taking a wrong decision.*

рубежных изданиях. В первых работах этого цикла [2–4] показано, что ПП провоцируются макрочастицами субмиллиметровых размеров, образующимися в камерах вследствие эрозии контактов. Опытным путём установлено, что частота ПП, максимальная непосредственно после отключения тока, уменьшается по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau \approx 0,1$  с. В итоге, не менее 95% общего количества ПП, сопровождающих данную операцию отключения, происходит в камерах выключателя за первые 0,3 с приложения восстанавливающегося напряжения. За пределами этого интервала времени оказывается не более 5% общего количества, могущих произойти ПП. Поэтому при испытаниях увеличивать время приложения восстанавливающегося напряжения сверх 0,3 с не имеет смысла. Делать этот интервал существенно меньше также не следует, поскольку при этом окажется не выявленной часть ПП. Интервал 0,3 с является оптимальным. Отметим, что в ГОСТ 687-78 (п.7.6.4.5) время приложения восстанавливающегося напряжения ограничено: не более 0,1 с. Именно оно реализуется при сертификационных испытаниях, при этом доля выявленных ПП не превышает 63% возможного их числа. Для получения достоверных данных о числе ПП при испытаниях данного аппарата в программе испытаний необходимо указывать длительность приложения восстанавливающегося напряжения не менее 0,3 с, причём этот порядок должен реализовываться до введения этой нормы в ГОСТ 687.

В [5] показано, что в ходе эксплуатации вакуумного выключателя вероятность возникновения ПП уменьшается в несколько раз после выполнения десятков коммутационных операций, как при номинальном токе, так и при номинальном токе отключения. Поэтому при испытаниях не бывшего в эксплуатации выключателя получают завышенную частоту ПП, против ожидаемой после истечения периода приработки.

В целом не следует драматизировать ситуацию с возникновением ПП. Во-первых, обычно они возникают довольно редко: на выключателях после периода их приработки наблюдается не более не-

скольких ПП на сотню операций отключения. Во-вторых, в трёхполюсных выключателях в цепях с изолированной нейтралью во всём диапазоне отключаемых токов ПП, как правило, не сопровождаются протеканием тока промышленной частоты. Дело ограничивается кратковременным нарушением равномерности деления восстанавливающегося напряжения между полюсами выключателя. В-третьих, в однополюсных выключателях возникновение ПП не сопровождается током промышленной частоты при отключении токов, не превышающих номинальный ток, и может сопровождаться протеканием самопрерывающейся полуволны тока при отключении тока КЗ.

При коммутации ёмкостного тока к межконтактному промежутку камеры прикладывается восстанавливающееся напряжение, содержащее наряду с переменной также и постоянную составляющую. Постоянное восстанавливающееся напряжение прикладывается к межконтактному промежутку камеры также в вакуумных выключателях постоянного тока с принудительным переводом тока дуги через нулевое значение наложением импульсов тока противоположного направления. В этих случаях представляет интерес сопоставление числа ПП камер при восстанавливающихся напряжениях постоянного и переменного тока. Этот вопрос рассмотрен в [6], где показано, что число ПП на постоянном напряжении может быть в несколько раз больше, чем на переменном.

В [7] дано объяснение того, что спорадические ПП камер трёхполюсного вакуумного выключателя в цепи с изолированной нейтралью обычно не приводят к протеканию тока через нагрузку, т.е. процесс ограничивается стадией не поддержанного ПП (НПП). Для возникновения тока через нагрузку необходимо, чтобы с разновременностью не более десятка микросекунд пробилась камера в двух полюсах выключателя. Однако, как показано в [7], вероятность такого совпадения при умеренной напряжённости электрического поля на контактах камер мала, и процесс останавливается на стадии НПП, который не приводит к нарушениям в работе отключённой нагрузки.

Эти исследования оказались в центре внимания зарубежных коллег, были многократно ими повторены и нашли отражение в изменении методики испытаний высоковольтных выключателей, зафиксированной в стандарте МЭК 62271-100 [8]. Время приложения восстанавливающегося напряжения при испытаниях было увеличено с 0,1 до 0,3 с и более. Кроме того, признано допустимым возникновение НПП. Надеемся, что эти изменения в методике испытаний найдут отражение и в готовящейся к выходу новой редакции ГОСТ 687.

Испытания вакуумных выключателей сквозным током КЗ. Другая особенность вакуумных выключателей проявляется при их испытаниях сквозным током КЗ. В соответствии с ГОСТ 687 все выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В испытываются на стойкость при

сквозных токах КЗ. При этом виде испытаний выключатель проверяется на способность пропустить через сомкнутые контакты предельный (трёх-, четырёхсекундный) ток термической стойкости, значение которого соответствует номинальному току отключения  $I_{о.ном}$ , и на способность пропустить ток с наибольшим пиком  $i_b = 2,55 I_{о.ном}$  (в некоторых случаях требуется, чтобы  $i_b \cong 3 I_{о.ном}$ ).

При испытании сквозным током КЗ аппарат подвергается значительным термическим и динамическим нагрузкам, которые не должны вызывать остаточных явлений, препятствующих его дальнейшей нормальной работе [9]. Одно из таких явлений – сваривание между собою контактов выключателя. Обычно сваривание контактов происходит вследствие утраты контактной парой так называемой динамической устойчивости, наступающей в случае, когда мгновенное значение силы электродинамического отброса контактов превышает силу контактного нажатия. При этом между контактами образуется зазор, в котором горит дуга тока КЗ, поверхности контактов оплавляются, и при последующем соприкосновении контактов под действием силы нажатия происходит приваривание одного контакта к другому. При таком развитии событий дальнейшая нормальная работа выключателя становится невозможной. В правильно спроектированном выключателе сила контактного нажатия  $F_2$  должна быть всегда больше силы электродинамического отброса  $F_1$ . Последняя возрастает пропорционально сквозному току. О значениях  $F_1$  контактов в камерах типов КДВ-35 при различных пиках сквозного тока и рекомендуемых значениях  $F_2$  можно судить по рис.1. Из него следует, что в выключателе с этими камерами и номинальным током отключения  $I_{о.ном} = 40$  кА, когда наибольший пик тока КЗ может достигнуть значения  $i_b = 2,55 I_{о.ном} = 2,55 \cdot 40 \cong 100$  кА,  $F_1 = 2,6$  кН, а рекомендуемое значение  $F_2 = 4,0$  кН. Это на новом, не бывшем в работе, выключателе. С выработкой механического и электрического ресурсов выключателя сила  $F_2$  уменьшается. Полуторакратное превышение  $F_2$  над  $F_1$  в новом выключателе является достаточным условием для предотвращения отброса контактов в конце срока службы аппарата. Разумеется, что для камер других типов зависимость силы отброса от тока будет отличаться от приведённой на рис.1, как правило, в сторону больших значений  $F_1$ . Приведённая зависимость даёт представление о возможных значениях этой силы.

Последствия прохождения сквозного тока через вакуумный выключатель оказываются принципиально иными, нежели в выключателях других типов. Для выключателей, контакты которых работают в газообразной (воздух, элегаз) или жидкой (масло) среде, необходимым и достаточным условием сохранения работоспособности после прохождения сквозного тока является отсутствие отброса контактов и тем самым исключение их сварки. В отличие от названных выключателей, контакты вакуум-



ного выключателя свариваются между собой даже при полном исключении отброса. В [10] приведены результаты измерений силы сварки пар контактов из наиболее часто применяемых материалов. Особое внимание было уделено контактам из хромо-медных композиций, наиболее широко используемых в камерах для силовых выключателей. Показано, что сила сварки и разброс её значений возрастают с увеличением силы тока и что сила сварки при наличии отброса и без него сравнимы между собою (рис.2). При пике сквозного тока 80–90 кА сила сварки контактов из композиции CuCr (50%) достигает 3,5–4,2 кН. Она несколько возрастает с увеличением содержания меди в композиции. В дополнение к [10] приведём результат измерения разработчиков камеры КДВ-35, полученный при исследовательских испытаниях камеры. В этой камере при пике сквозного тока 160 кА и отсутствии отброса наибольшее значение силы сварки достигало 7 кН! Материал контактов камеры CuCr (50%). Кроме того, вывод [10] о сравнимости силы сварки контактов при наличии отброса и без него справедлив для случая, когда отброс контактов непродолжителен, имеет место в течение одной–двух полуволн тока КЗ. В практике испытаний известны случаи, когда отброс контактов происходил в течение многих полуволн тока. При этом сила сварки многократно превосходила наблюдаемую без отброса и дело кончалось заменой камер.

Из приведённых данных о прочности сварки контактов следует, что для её разрыва необходимы усилия, как правило, превосходящие развиваемые пружинами отключения. Разрыв сварного соединения контактов производится за счёт силы удара  $F_{уд}$ , возникающей в узле нажатия. Механизм возникновения этой силы продемонстрируем с помощью рис.3, на котором представлена общепринятая кинематическая схема полюса вакуумного выключателя.

В позиции "включено" обязателен зазор  $L$  между крышкой 5 и тарельчатым элементом 6. Этот зазор называется "вжимом". Наличие вжима гарантирует заданную силу контактного нажатия и определяет силу удара.

При подаче команды на отключение фиксатор 11 отходит от выступа 10, освобождая тягу 9. Под

действием сил  $F_2$  от пружины контактного нажатия 7 и  $F_0$  от пружины отключения 12 происходит ускоренное движение всех соединённых механически между собою подвижных частей полюса и привода, кроме ввода 2 и тарельчатого элемента 6. При этом на пути вжима  $L$  указанные подвижные части обретают количество движения  $mv$ , где  $m$  – приведённая масса подвижных частей,  $v$  – их скорость. В момент прохождения вжима  $L$  крышка корпуса 5 ударяет по тарельчатому элементу 6, вызывая силу удара  $F_{уд}$ , которая через вывод 2 передается на сварное соединение контактов камеры 1. Можно показать, что сила удара достигает значения

$$F_{уд} = (k/\Delta t) \sqrt{mL(F_0 + F_2)}. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta t$  продолжительность действия  $F_{уд}$ ,  $k$  – коэффициент.

При силе удара больше силы сварки контактов произойдёт их размыкание, т.е. команда на отключение будет выполнена. В противном случае необходимо констатировать отказ в работе выключателя.

Все члены, входящие в выражение (1), характеризующие состояние выключателя в процессе его эксплуатации, кроме  $L$ , практически не изменяются, а следовательно, не влияют на  $F_{уд}$ . Напротив, значение  $L$  с выработкой электрического и механического ресурсов выключателя постепенно уменьшается.

У нового выключателя значение вжима равно номинальному  $L_0$ , т.е.  $L = L_0$ . В ходе эксплуатации выключателя происходит износ контактов камеры. При полной выработке электрического ресурса износ контактов достигает  $\Delta d$ . Значение износа указывается в ТУ на камеры. Обычно  $\Delta d = 3$  мм. Как видно из рис.3, на это значение уменьшается вжим, т.е.  $L = L_0 - \Delta d$ .

Кроме того, при выработке механического ресурса выключателя изнашиваются шарнирные соединения и фиксаторы привода, в том числе фиксатор 10 и выступ 11. Это приводит к изменению позиции нажимного устройства на  $\Delta S_1$ . У хорошо спроектированного выключателя  $\Delta S_1 \leq 1$  мм.

Третья составляющая  $\Delta S_2$  уменьшения  $L$  с течением времени состоит в необратимой деформации силовых конструкций выключателя под действием ударных нагрузок, возникающих в этих конструкци-

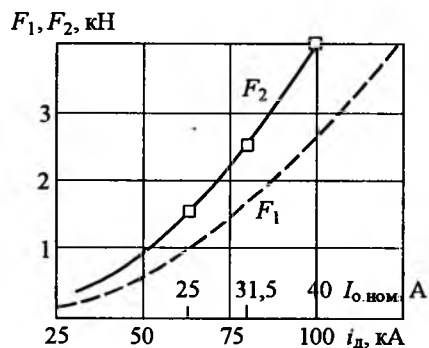


Рис.1. Зависимости сил  $F_1$  и  $F_2$  от наибольшего пика сквозного тока КЗ для камер на 35 кВ:

$F_1 = 0,26i_d^2$  – сила электродинамического отброса контактов;  $F_2 = 0,4i_d^2$  – контактное нажатие при наибольшем вжиме контактов; □ – контактное нажатие по ТУ на камеры

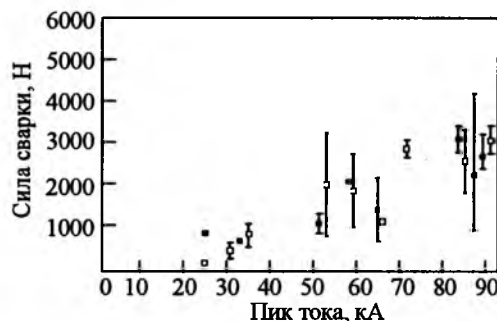
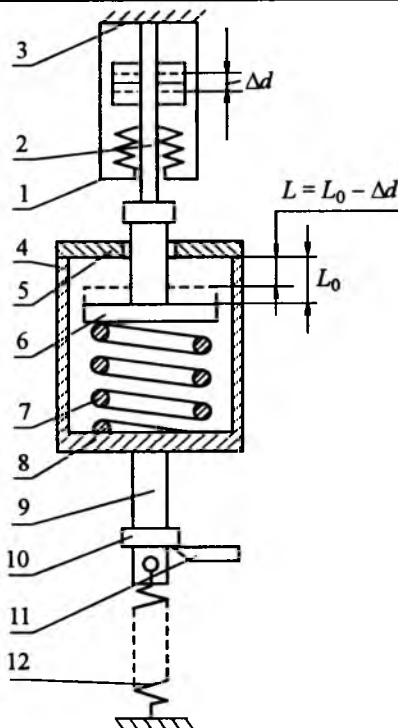


Рис.2. Зависимость силы сварки от пика тока:

□ – Cu – 50%, W – 2%, Cr – остальное; ■ – Cu – 50%, Cr – остальное [10]

Рис.3. Кинематическая схема полюса вакуумного выключателя с узлом нажатия контакта:

1 – вакуумная дугогасительная камера; 2 – её подвижный вывод; 3 – фланец крепления камеры; 4–8 – узел контактного нажатия, 4 – корпус, 5 – крышка, 6 – тарельчатый элемент, 7 – пружина контактного нажатия; 8 – дно корпуса; 9 – тяга; 10 – выступ; 11 – фиксатор; 12 – пружина отключения; позиции элементов полюса выключателя изображены в положении "включено"



ях при коммутационных операциях. Опыт показывает, что её значение также может достигать  $\Delta S_2 \approx 1$  мм. Таким образом, вжим к концу срока эксплуатации выключателя или ко времени выработки его электрического и механического ресурсов может уменьшиться на сумму:

$$\Delta L = \Delta d + \Delta S_1 + \Delta S_2$$

и вместо  $L_0$  будет равен

$$L = L_0 - (\Delta d + \Delta S_1 + \Delta S_2) = L_0 - \Delta L.$$

Для сохранения заданной силы контактного нажатия считается допустимым уменьшение вжима в ходе эксплуатации выключателя в два раза [9]. Если принять эту норму и для расчёта уменьшения силы удара, то эта сила в соответствии с (1) уменьшится

в  $\sqrt{2}$  раз, т.е. снизится на 30% в сравнении с силой удара в новом выключателе. Это существенное уменьшение силы удара, и вполне возможна ситуация, когда после многолетней нормальной работы выключателя он вдруг не отключит ток КЗ по причине сваривания между собою контактов камеры.

Разработчики вакуумных выключателей, стремясь к экономии, зачастую ограничиваются минимальными значениями вжима, при котором обеспечивается разрыв сварного соединения контактов камеры на новом выключателе, т.е. при  $L = L_0$ . Так, в недавней публикации сообщается о завершении разработки нового мощного вакуумного выключателя на номинальный ток 3150 А, номинальный ток отключения 40 кА, наибольший пик сквозного тока 128 кА с электрическим ресурсом 10 тыс. циклов "включено-отключено" (ВО). При этом, на начало эксплуатации аппарата запроектировано значение вжима  $L_0 = 4$  мм. Согласно [11] износ контактов камеры при выполнении 10 тыс. циклов ВО при токе 3150 А будет не менее 3 мм. С учётом механичес-

кого износа элементов привода окажется, что ко времени выработки продекларированных значений электрической и механической износостойкости вжим окажется равным нулю, что неизбежно приведёт к отказу выключателя при отключении КЗ.

Предотвратить эту ситуацию можно путём периодических ревизий и регулировок узла нажатия контактов так, чтобы значение вжима оставалось близким к  $L_0$ . Но таким образом утрачивается основное достоинство вакуумных выключателей, состоящее в исключении дополнительных регулировок при эксплуатации. Необходимость же периодических регулировок открывает путь влиянию "человеческого фактора", что крайне нежелательно.

Для отбраковки вакуумных выключателей с описанным скрытым дефектом необходимо как исследовательские, так и квалификационные испытания аппарата выполнять с учётом будущего уменьшения значения вжима. Для этого на время проведения испытаний вжим контактов перед испытаниями устанавливают уменьшенным на значение ожидаемой убыли, образующейся в ходе эксплуатации выключателей

$$\Delta L = \Delta d + \Delta S_1 + \Delta S_2.$$

Можно ожидать, что  $\Delta L$  будет не менее 3 мм.

Уменьшить в новом выключателе значение вжима на  $\Delta L$  можно несколькими приёмами: сместить на  $\Delta L$  корпус камеры (на рис.3 вверх); на  $\Delta L$  изменить (уменьшить) длину тяги 9, что возможно за счёт имеющихся в выключателе регулировок.

#### Выводы

Положительные результаты испытаний предопределяют надёжную работу выключателя при коммутациях токов КЗ на протяжении всего срока службы. Требование о проведении испытаний при уменьшенном вжиге и конкретном значении уменьшения  $\Delta L$  для испытуемого типа выключателя необходимо зафиксировать в ТУ на этот аппарат, а результаты испытаний отразить в соответствующем протоколе. Желательно также в возможно более короткий срок ввести эту норму в ГОСТ 687.

#### Список литературы

1. Публикация МЭК 50 (441). Международный электротехнический словарь. Гл. 441. П. 441-17-46. 1984.
2. Рыльская Л.А., Перцев А.А. Электрическая прочность вакуумной дугогасительной камеры после отключения тока // Электротехника. 1985. №1.
3. Рыльская Л.А., Перцев А.А. Dielectric strength of a vacuum interrupter after current interruption // XI-th ISDEIV, Берлин, 1984.
4. Перцев А.А., Рыльская Л.А., Ульянов К.Н., Чулков В.В. Расчёт вероятности повторных пробоев вакуумной дугогасительной камеры // Электричество. 1989. №8.
5. Перцев А.А., Рыльская Л.А. Частота повторных пробоев в начальной стадии эксплуатации вакуумных дугогасительных камер // Электротехника. 1991. №7.
6. Перцев А.А., Рыльская Л.А. Повторные пробои вакуумных дугогасительных камер // Электричество. 1993. №8.
7. Перцев А.А., Рыльская Л.А., Чулков В.В. Повторные пробои двух соединённых последовательно вакуумных дугогасительных камер // Электричество. 1991. №3.
8. Стандарт МЭК 62271-100.
9. Чунихин А.А. Электрические аппараты. М., 1975, С. 8, 91.
10. Белкин Г.С., Лукацкая И.А. Исследование свариваемости контактов // Электротехника. 2000. №7.
11. Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Перцев А.А., Ромочкин Ю.Г. Новые разработки ВЭИ в области вакуумных дугогасительных камер // Электротехника. 2001. №9.

# Комплексная оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов при испытаниях и в эксплуатации<sup>1</sup>

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

Представлены теоретические и экспериментальные подходы для оценки механического состояния обмоток, направленные на повышение надёжности трансформаторов. Приведены примеры применения комплексного подхода к оценке механического состояния обмоток некоторых силовых трансформаторов с целью повышения их надёжности. Показано, что эффективность оценки существенно возрастает при использовании комплексного подхода, включающего измерение сопротивления КЗ, диагностику методом частотного анализа, а также расчёты электродинамической стойкости по специальным программам.

Надёжность трансформатора в значительной степени определяется его способностью выдерживать электродинамические воздействия, возникающие при КЗ, и зависит от стабильности механических характеристик обмоток, их конструкции, технологии изготовления. Недостаточная электродинамическая стойкость обмоток при КЗ, приводящая к механическим деформациям обмоток, является одной из основных причин выхода трансформаторов из строя.

Перед вводом в эксплуатацию электродинамическая стойкость трансформатора (а значит, и его надёжность) должна быть доказана одним из следующих способов: испытаниями на стойкость при КЗ, электродинамическими расчётами, анализом конструкции или сравнением с испытанным ранее прототипом. В эксплуатации текущее состояние трансформатора определяется на основании результатов диагностики.

## Методы оценки

При испытаниях трансформаторов на стойкость при КЗ в условиях испытательной лаборатории контроль состояния обмоток во время опытов КЗ позволяет обнаружить изменения в состоянии обмоток на ранней стадии их появления – до того, как они перерастут в обширные деформации. Ещё большее значение имеет раннее обнаружение начальных развивающихся деформаций в эксплуатации. Очевидно, что в условиях испытательной лаборатории легче обеспечить эффективный контроль – за счёт применения таких методов и средств, использование которых в эксплуатации затруднительно или даже невоз-

*In the report theoretical and experimental approaches for assessment of winding condition are given with the purpose of enhancement of transformer reliability. It is shown that multipronged approach is desirable for this assessment. This approach includes diagnostics by FRA technique, short-circuit impedance measurements and calculations of short-circuit strength by special programs. Some examples of combined assessment of winding's mechanical condition of power transformers and results of reliability improvement of transformer are presented in this paper.*

можно. Так, при испытаниях трансформаторов на стойкость при КЗ в ВЭИ для контроля изменения уровня запрессовки обмоток, измерения значения электродинамических сил, действующих на опоры обмоток, применяются тензометрические датчики сил [1]. Другим эффективным средством контроля изменения геометрии обмоток в результате их смещения при КЗ является измерение прибором ПЗМП, разработанным в ВЭИ, распределения радиальной составляющей индукции поля рассеяния по высоте обмоток трансформатора [2].

Однако реально в эксплуатации для оценки механического состояния обмоток используются, в основном, два метода: метод измерения сопротивления КЗ  $Z_k$  и метод частотного анализа МЧА.

Метод  $Z_k$  в силу своей простоты получил в России наиболее широкое применение. В соответствии с [3,4] он должен применяться для трансформаторов мощностью 125 МВ·А и выше, однако фактически применяется и для трансформаторов меньшей мощности. Допускается изменение  $Z_k$  до 3% по сравнению со значениями, измеренными при вводе трансформатора в эксплуатацию, и 5% – по сравнению с паспортным значением, рассчитанным по напряжению КЗ. (Стоит отметить, что в соответствии с ГОСТ 20243 и международным стандартом IEC 60076.5 допустимое изменение  $Z_k$  при испытаниях на стойкость при КЗ не превышает 1% для трансформаторов свыше 100 МВ·А). Недостатком метода  $Z_k$  является его невысокая чувствительность к некоторым видам деформаций обмоток.

Другим известным методом, применяемым для диагностики механического состояния обмоток, является метод частотного анализа. В России этот метод, более известный как метод низ-

<sup>1</sup> Работа поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований (РФФИ).

ковольтных импульсов, получил широкое распространение сначала для контроля состояния обмоток при испытаниях трансформаторов на стойкость при КЗ в условиях испытательных стендов, а затем и для диагностики трансформаторов в эксплуатации. Так, с 1974 г. диагностические установки типа "Импульс", разработанные и изготавливаемые в ВЭИ, применялись в ряде стран СНГ и в энергосистемах, электростанциях и крупных предприятиях России. Суть метода низковольтных импульсов заключается в подаче на обмотку трансформатора (или в нейтраль) зондирующего импульса низкого напряжения и регистрации откликов – реакций обмоток на воздействие зондирующего импульса. Механическое состояние обмоток оценивается по изменениям в записанных осциллограммах и частотах: любые изменения в геометрии обмоток приводят к изменению соответствующих ёмкостей и индуктивностей и, соответственно, к изменению спектра частот [5]. Последняя модификация установки "Импульс-8" включает в себя портативный компьютер с установленными в нём платами для записи и обработки сигналов, а также генератор импульсов. Программное обеспечение позволяет производить калибровку, тестирование измерительной схемы, запись сигналов, фильтрацию, сохранение в базе данных, сравнение осциллограмм, средства их обработки и анализа. Вывод о наличии или отсутствии деформаций в обмотках принимается на основе критериев, заложенных в программу.

Наряду с экспериментальными методами в ВЭИ для оценки механического состояния обмоток трансформаторов используются электродинамические расчёты с помощью специальных программ типа РЭСТ, ДИНАР, ТОК.

Методика и программа РЭСТ предназначены для определения осевых, радиальных и тангенциальных сил КЗ для каждого диска каждой обмотки, а также для расчёта осевых сил, действующих на прессующие конструкции обмоток заданного типа. Программа определяет как возникающие, так и допускаемые значения осевых, радиальных и суммарных напряжений, а также остаточные деформации и коэффициенты запаса.

Программа ДИНАР оценивает осевые силы и перемещения обмоток при заданной силе прессовки с учётом динамических процессов во времени. При расчётах также учитывается жёсткость прессующих конструкций и изоляции.

Программа ТОК позволяет рассчитывать значения реактансов и токов КЗ в обмотках с учётом различных типов деформаций обмоток.

Все программы могут использоваться для анализа стойкости при КЗ силовых, преобразова-

тельных, печных стержневых трансформаторов мощностью от 25 кВ·А до 1000 МВ·А и напряжением до 1150 кВ с концентрическими обмотками различных типов (слоевые, дисковые, винтовые...) и конфигурации (расщеплённые, соединённые в звезду, треугольник либо зигзаг). Обмотки могут быть выполнены из прямоугольного обычного, подразделенного или транспонированного (в том числе склеенного), а также круглого провода из меди разной степени прочности или алюминия.

**Расчёт осевых сил.** Обмотка является сложной механической системой. Упрощающие допущения сводят задачу к расчёту распределения действующих сил сжатия вдоль сложного упругого стержня (состоящего из чередующихся жёстких и податливых изоляционных участков) на упругих опорах. Напряжений растяжения в таком стержне не бывает, при этом в стержне возникают зазоры. В расчёте дважды проводится интегрирование радиальной составляющей магнитной индукции по высоте: один раз для нахождения суммарной силы в катушках, и второй раз для суммирования деформаций изоляции обмотки для решения статически неопределимой задачи. В результате расчёта получаются распределение сил по длине стержня – обмотки  $P(y)$ , а также силы на верхней и нижней опорах  $P_v$  и  $P_n$ , которые используются в дальнейшем для механического расчёта на прочность узлов опорной конструкции. Определяется также условная характерная расчётная сила прессовки  $\bar{P}_0$ , при которой в обмотке не возникают зазоры. Умножая эту силу на коэффициент прессовки (0,4–1,0 в зависимости от типа трансформатора), находим рекомендуемую минимально допустимую силу прессовки  $P_0$ . По результатам расчёта определяются наибольшая сила сжатия проводов внутри обмотки (концентра)  $P_{\max}$  и соответствующее ей давление, которое не должно превышать допустимого значения – критического давления потери осевой устойчивости проводников, при котором происходит их полегание. При совместной запрессовке обмоток общим прессующим кольцом проводится расчёт распределения сил прессовки между обмотками и даются рекомендации, как избежать нежелательного неравномерного их распределения.

**Пакет РЭСТ** включает программу ДИНАР для расчёта динамических осевых сил с учётом сил инерции, веса, внешнего и внутреннего трения в изоляции, что позволяет оценить опасность резонансных и ударных явлений в обмотках.

**Расчёт радиальных сил.** Растягиваемые обмотки рассчитываются на прочность, сжимаемые – на прочность и устойчивость (потерю формы).

Реально катушка состоит из многих витков, в пределах радиального размера по виткам радиальная сила распределена неравномерно: на внешнем витке сила минимальна, на внутреннем – максимальна. Катушка представляет собой с точки зрения механического расчёта многослойную оболочку: жёсткие слои – проводники, мягкие слои – витковая изоляция. Внутренние слои, растягиваясь, давят на соседние витки, создавая в изоляции напряжения сжатия. Из-за этого происходит выравнивание напряжений растяжения по проводникам. Решение этой сложной механической задачи с учётом многих факторов, в том числе нелинейности меди (алюминия) и витковой изоляции, дано в [6] и использовано в пакете РЭСТ. Напряжение растяжения или сжатия провода не должно превышать допустимого значения, а относительная остаточная деформация крайнего провода – определенного допускаемого предела, опасного из-за возможного разрыва изоляции. Как правило, обеспечение прочности растягиваемых обмоток вызывает затруднения только в трансформаторах большой мощности, для которых при этом приходится идти или на дополнительное вложение меди, или применять упрочнённые сплавы.

Потеря устойчивости обмоток – одна из самых частых причин аварий трансформаторов в эксплуатации и при испытаниях на стойкость при КЗ. Характерная деформация потери радиальной устойчивости – волна радиальных деформаций вдоль почти всей высоты обмотки там, где максимальна осевая индукция магнитного поля рассеяния. Деформированная при потере устойчивости каждая катушка почти по всему периметру "обжимает" расположенный внутри нее стержень или обмотку, а в одном месте она имеет несимметричный выброс, волну.

Методика расчёта на радиальную устойчивость заключается в определении среднего напряжения сжатия каждой катушки обмотки и сравнении его с критическим напряжением  $[\sigma_{кр}]$ :

$$[\sigma_{кр}] \neq K_1 K_2 K_3 D (1 + K_4 b) K_5,$$

где  $K_1$  – коэффициент, зависящий от осевого давления в прокладках  $\sigma(y)$ , определяемого при расчёте осевых сил, этот коэффициент отражает то, что критическое давление увеличивается при увеличении  $\sigma(y)$ ;  $K_2$  – коэффициент, зависящий от модуля упругости материала (меди или алюминия), он различен для случаев наличия и отсутствия радиальных опор относительно стержня магнитопровода или другой обмотки (при расчёте трансформаторов по ряду причин приходится принимать, что опоры обмоток на стержень нет);  $K_3$  – коэффициент, зависящий от числа столбов прокладок обмотки;  $K_4$  – коэффициент,

зависящий от расстояния между центрами опорных элементов (пролёта), он минимален при больших пролётах и при отсутствии опор;  $K_5$  – коэффициент, отражающий зависимость от типа провода (обычного, подразделенного, транспонированного);  $D$  – диаметр обмотки;  $b$  – осевой размер провода.

Данная формула получена в результате испытаний в устройстве МДУ [6] сотен моделей, имеющих диаметр и радиальный размер, соответствующие обмотке трансформатора, но существенно меньшую высоту, а также тщательного анализа результатов испытаний и аварий трансформаторов.

**Расчёт тангенциальных сил.** В эксплуатации и при испытаниях на стойкость при КЗ наблюдаются деформации, которые свидетельствуют о действии на обмотки тангенциальных (по направлению) сил. Возможные последствия действия этих сил: поворот всей обмотки вокруг своей оси, скручивание (или раскручивание) обмотки, когда верхняя и нижняя половины поворачиваются в разные стороны, комбинация поворота и скручивания обмотки или её части; тангенциальные перемещения и изгибы вертикальных и горизонтальных отводов, повороты и изгибы крайних витков отдельных катушек, переходов между катушками. В результате тангенциальных перемещений обмоток могут возникнуть опасные деформации отводов, их натяжение, соприкосновение с прессующими кольцами и другими деталями. При этом могут произойти замыкания между витками или на землю, что влечёт дальнейшие разрушения. Теоретически тангенциальная сила возникает тогда, когда в обмотке имеется осевой или радиальный ток. Эта сила определяется как алгебраическая сумма двух произведений осевого тока на радиальную индукцию и радиального тока на осевую индукцию. Тангенциальные силы тем больше, чем больше осевые силы, но самое главное, они намного больше в низковольтных обмотках, чем в высоковольтных. При оценочных расчётах можно применить приближённую формулу:

$$F_{\tau}(\Delta y) = \pm [P(y) - P(y + \Delta y)] \times (h / \pi D) / w,$$

где  $h$ ,  $D$  и  $w$  – высота, средний диаметр и число витков обмотки;  $P(y)$  и  $P(y + \Delta y)$  интегральные осевые силы на нижней и верхней границе рассматриваемой части обмотки высотой  $\Delta y$ .

Тангенциальные силы в обмотке, находящейся в собственном (или "естественном") магнитном поле всегда закручивают обмотку (уменьшая диаметр обмотки). Действие тангенциальных сил имеет особенность, заключающуюся в накоплении тангенциальных перемещений в обмотках. Такой кумулятивный эффект, приводящий к на-

коплению после каждого КЗ сдвига реек и столбов прокладок, в конечном итоге может привести к соскакиванию столбов прокладок с ярмовой изоляции, потере прессовки обмотки и т.д. По разработанной методике производятся расчёты электромагнитных тангенциальных сил, действующих на обмотки и их элементы, на отводы и их вертикальные и горизонтальные части, на особые крайние катушки, суммарных тангенциальных сил, необходимых для расчёта крепления обмоток, отводов, бандажей крайних катушек, а также тангенциальных деформаций (перемещений) обмоток и их частей. Представляется, что такой расчёт даёт более точные и хорошо объяснимые результаты, чем расчёт тангенциальных сил как не скомпенсированных радиальных сил на торцах обмоток.

### Примеры комплексного подхода к оценке механического состояния обмоток

Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих комплексный подход к оценке стойкости трансформаторов при КЗ, проведённой при испытаниях, аварии и обследовании трансформаторов.

1. *Испытания на стойкость при КЗ трансформатора 6300 кВ·А, 35 кВ.* Трансформатор двухобмоточный, обмотки слоевые, обмотка НН выполнена из двух концентров. До испытаний трансформатора были предварительно проведены электродинамические расчёты по программе РЭСТ. Расчёты показали (рис. 1, а), что практически во всех витках обмотки НН возникающее при нормируемом наибольшем токе КЗ радиальное напряжение на 1–5% превышает допускаемое

критическое значение, т.е. при испытаниях на стойкость при КЗ возможны деформации обмотки НН в виде потери радиальной устойчивости.

Несмотря на отрицательные результаты расчёта, заказчик принял решение проводить испытания. Испытания проводились пофазно, измерения методом НВИ и измерения  $Z_k$ : до испытаний, а также после каждого опыта КЗ. Измерения методом НВИ зафиксировали изменения в НВИ-осциллограммах (рис. 1, б), указывающие на возникновение остаточных механических деформаций в обмотках. Несмотря на то, что изменение  $Z_k$  на фазах В и С не превысило 1%, было принято решение остановить испытания, а результаты испытаний данного трансформатора признать отрицательными, основываясь на результатах расчёта.

При разборке обнаружено повреждение в виде потери радиальной устойчивости наружного центра обмотки НН – в самой начальной стадии своего развития (рис. 1, в).

2. *Испытания на стойкость при КЗ трансформатора 2500 кВ·А, 10 кВ.* Трансформатор двухобмоточный, обмотка ВН – слоевая, обмотка НН – винтовая. Испытания проводились при предварительно закороченной обмотке НН, напряжение подавалось со стороны обмоток ВН.

Трансформатор испытывался пофазно. Фаза А сначала подверглась двум наладочным опытам при токах КЗ, составлявших 50 и 80% нормируемого расчётного тока КЗ. При этом никаких изменений в осциллограммах и спектрах НВИ не зафиксировано. После 1-го опыта при токе КЗ, равном 97% нормируемого расчётного тока, в осциллограммах и спектрах НВИ были зафиксиро-

ваны очень большие изменения, свидетельствующие о повреждении трансформатора (рис. 2). Изменение  $Z_k$  после опыта, не превысило 0,5%.

Электродинамические расчёты, предварительно проведённые перед испытаниями трансформатора, также показывали, что обмотки обладают большим запасом прочности к воздействию токов КЗ: коэффициент запаса больше 1,5. Несмотря на это было принято решение остановить испытания и провести осмотр активной части трансформатора. Разборка трансформатора показала

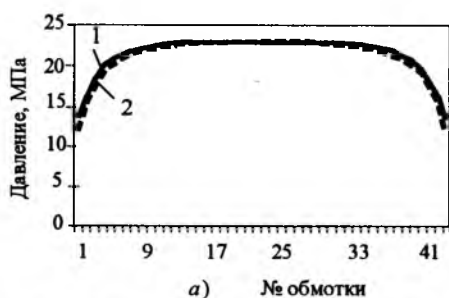


Рис. 1. Распределение радиальных напряжений по высоте обмотки НН (а, 1 – среднее; 2 – критическое), изменение в НВИ-осциллограммах (б), деформация в виде потери радиальной устойчивости обмотки НН (в) трансформатора 6300 кВ·А



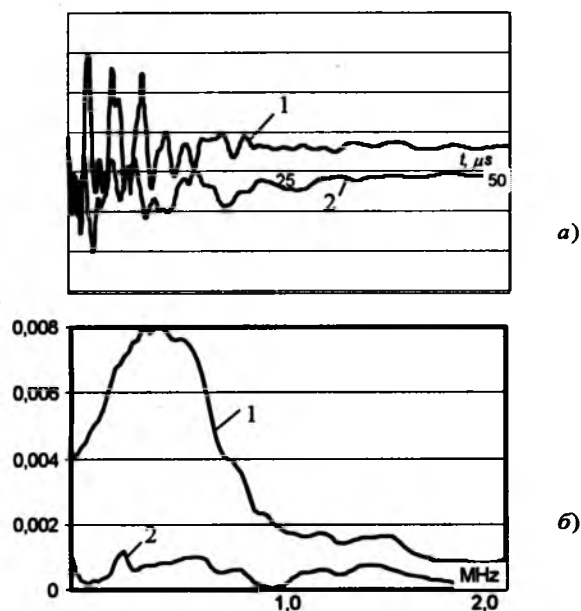


Рис.2. НВИ-осциллограммы (а) и спектры их частот (б) трансформатора 2500 кВ·А, 10 кВ:

1 – 80%; 2 – 100%

ла, что вследствие скручивания отводов из-за воздействия тангенциальных сил нулевая шина закороченной при испытаниях обмотки НН сместилась и коснулась бака трансформатора. Естественно, что при такой схеме измерений метод  $Z_k$  оказался нечувствителен к данному виду повреждения. Методика расчёта тангенциальных сил в тот период ещё не была разработана.

3. Испытания на стойкость при КЗ трансформатора 400 МВ·А, 220 кВ. Трёхфазный дву-

хобмоточный трансформатор испытывался на стойкость при КЗ пофазно: в соответствии с ГОСТ 20243 каждая фаза должна была подвергнуться 5 воздействиям тока КЗ с наибольшей апериодической составляющей.

До испытаний были проведены электродинамические расчёты по программе РЭСТ, которые показали, что критическое напряжение радиальной устойчивости  $[\sigma_{\text{buckl}}]$  равно 48 МПа, что значительно ниже среднего радиального напряжения  $\sigma_{\text{av}}$  в наружном концентре обмотки, равного 55,4 МПа. Таким образом, коэффициент запаса по радиальной устойчивости  $[\sigma_{\text{buckl}}]/\sigma_{\text{av}} = 0,87$ , что существенно ниже единицы, т.е. можно было предполагать, что

при испытаниях обмотки будут повреждены.

Во время испытаний проводились измерения методом НВИ: до испытаний, а также после каждого опыта КЗ. Эти измерения показали, что в обмотке НН при испытаниях всех фаз развиваются механические деформации (рис.3,а). На фазе А изменение  $Z_k$  составило 1,6%, а на фазах В и С изменение  $Z_k$  не достигло критического значения 1%. Несмотря на это, во избежание тяжёлых последствий было принято решение остановить испытания, а результаты испытаний данного трансформатора признать отрицательными, – основываясь на результатах измерений LVI и расчёта.

Последовавшая после испытаний разборка трансформатора на заводе-изготовителе подтвердила наличие деформаций на обмотках НН всех трёх фаз (рис.3,б,в).

4. Обследование в эксплуатации трёхфазного автотрансформатора 200 МВ·А, 330 кВ. Автотрансформатор был выведен из эксплуатации для обследования после его автоматического отключения из-за КЗ на стороне среднего напряжения. Поскольку ранее диагностика методом НВИ на этом трансформаторе не проводилась, то механическое состояние обмоток оценивалось путём сравнения НВИ-осциллограмм и их спектров, записанных на разных фазах трансформатора.

Результаты измерений сопротивления КЗ (изменение  $Z_k$  составило примерно 3%) и измерений методом НВИ (значительное отличие в спектре в диапазоне частот 500–650 кГц, рис.4) заставили предположить, что на фазе С имеются механические деформации в области регулиро-

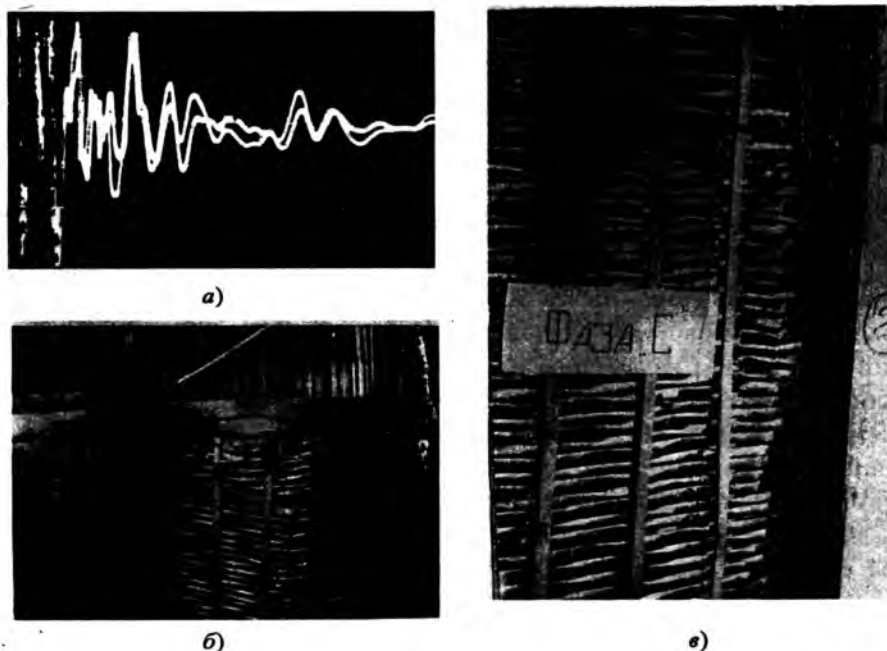


Рис.3. НВИ-осциллограммы (а) и деформации обмоток НН (б,в) трансформатора 400 МВ·А, 220 кВ.



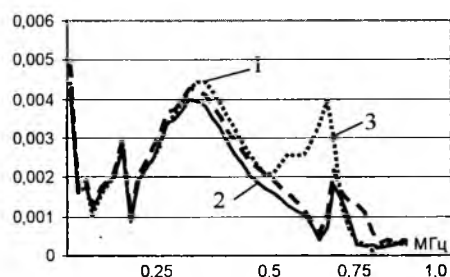


Рис.4. Спектры частот трёх фаз (а) и повреждённая регулировочная обмотка (б) трансформатора 200 МВ·А, 330 кВ:  
1 – фаза А; 2 – фаза В; 3 – фаза С

вочной обмотки. Для проверки этих предположений были проведены электродинамические расчёты. Расчёт по программе РЭСТ показал, что в регулировочной обмотке возникают недопустимые осевые силы "несимметрии", а также не выполняются условия осевой устойчивости (коэффициент запаса 0,8, т.е. существенно меньше единицы).

Трансформатор был выведен из эксплуатации. Разборка на ремонтном заводе подтвердила наличие осевых деформаций (сползание витков) регулировочной обмотки. Таким образом, применение комплексного подхода к оценке состояния автотрансформатора позволило доказать наличие механических деформаций в регулировочной обмотке и обосновано вывести автотрансформатор в ремонт.

5. *Обследование в эксплуатации однофазных автотрансформаторов 333 МВ·А, 750 кВ.* При плановом обследовании на АЭС четырёх автотрансформаторов (трёхфазная группа и резервный) результаты измерений методом НВИ показали существенное отличие состояния фазы А от трёх других (рис.5), свидетельствующее об обширных деформациях в зоне обмотки СН. Результаты других испытаний, включая ХАРГ и измерения  $Z_k$ , не обнаружили отклонений от нормы. В связи с этим дополнительно были проведены электродинамические расчёты по программе РЭСТ, которые показали, что все обмотки автотрансформатора (включая обмотку среднего напряжения) имеют достаточные запасы прочно-

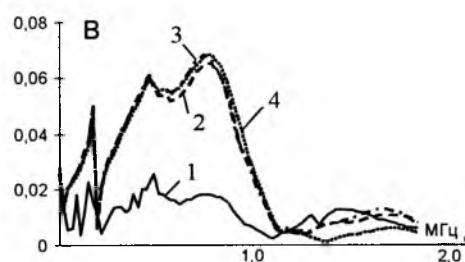


Рис.5. Спектры осциллограмм трансформатора 333 МВА, 750 кВ:

1 – фаза А; 2 – фаза В; 3 – фаза С; 4 – резерв

сти. Например, в обмотке среднего напряжения максимальные радиальные напряжения равны 60,7 МПа, а расчётные критические – 73,4 МПа, т.е. коэффициент запаса выше 1,2.

Это обстоятельство заставило более внимательно отнестись к предыстории этих трансформаторов. Выяснилось, что за несколько лет до этого на заводе-изготовителе проводился капитальный ремонт данной фазы, во время которого обмотка среднего напряжения была заменена, а ее конструкция модернизирована, что и привело к различию в результатах измерений методом НВИ, которые были обнаружены при диагностических измерениях. Таким образом, расчёты по методике РЭСТ позволили избежать больших затрат, связанных с необоснованным выводом трансформатора из эксплуатации.

## Выводы

Сочетание экспериментальных данных и теоретического подхода к оценке состояния трансформатора существенно повышает эффективность диагностики, способствуя снижению риска принятия неправильных решений, чреватых значительными экономическими затратами.

## Список литературы

1. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И. Влияние силы прессовки обмоток на поведение трансформаторов при КЗ // *Электротехника*. 1979. №11.
2. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И. Оценка уровня технологии изготовления обмоток трансформаторов по результатам динамических испытаний // *Электротехника*. 1997. №3.
3. РД 34.45-51.300-97. Объём и нормы испытаний электрооборудования. 6-е изд.
4. РД ЭО 0410-02. Методические указания по оценке состояния и продлению срока службы силовых трансформаторов.
5. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И., Андреев Д.В., Бельцер В.Р. Диагностика деформаций обмоток силовых трансформаторов и реакторов методом низковольтных импульсов // *Электрические станции*. 1997. №3.
6. *Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях* / Составитель Лурье А.И. М.: Знак, 2005.

# Увеличение дальности действия тепловизоров при исследовании высоковольтного электрооборудования

ОВЧАРОВ И.В.

*При измерении температурных полей оборудования часто возникают ситуации, когда исследуемые области имеют угловые размеры, сопоставимые с пространственным разрешением камеры. В этом случае неизбежно возрастает погрешность измерения. Для уменьшения погрешности следует предварительно измерить функцию передачи модуляции тепловизора и учитывать её при обработке результатов измерений. Практически это равноценно увеличению дальности действия без применения дорогих телеобъективов. Такой подход был успешно использован при исследовании маломасляных выключателей 4 энергоблока Нововоронежской АЭС.*

В данной статье поставлена задача повышения точности тепловизионных измерений мелко-структурных удалённых объектов, т.е. увеличения дальности действия тепловизоров.

Тепловизионный контроль и диагностика, наряду с другими методами, приобретает всё большее значение в электроэнергетике [1]. ВЭИ был родоначальником этого важного направления в нашей стране. В 1958 г. по инициативе чл.-кор. АН СССР, Героя Социалистического Труда П.В. Тимофеева В.И. Архангельский, И.А. Лобанёв и А.И. Горячев приступили к созданию первого тепловизора ВЭИ. Он имел сернисто-свинцовый приёмник и развёртку диском Нипкова [2].

В течение 60-х годов тепловизоры ВЭИ быстро совершенствовались. Начали применяться приёмники на основе сурьмянистого индия, конструировались новые сканеры. Были созданы наземный прибор "Контраст", вертолётный "Градус" и их модификации. Создавались многочисленные приборы для применения в электроэнергетике, строительстве, неразрушающем контроле, медицине. Один из них в 1969 г. награждён золотой медалью ВДНХ и рекомендован Минздравом СССР для серийного производства. В 1975 г. был внедрён авиационный тепловизор "Простор".

В 1983 г. был создан тепловизор с широким спектральным диапазоном на основе неохлаждаемого пироприёмника, с чувствительностью 0,3 К. Кроме традиционного применения, этот прибор был использован для экспериментов по активному радиовидению скрытых металлических и диэлектрических объектов. Работа проводилась в 1984–1985 гг. совместно с ИОФАН СССР.

В 1987 г. был разработан макет тепловизора на пировидиконе с тонкопленочной мишенью, из-

*It's not something uncommon that the areas being examined during measurement of the thermal fields of equipment have angular dimensions comparable to the spatial resolution of the camera. In such a case the growth of the measurement error is inevitable. The error can be reduced by the preliminary measurement of the thermal imager modulation transfer function which must be taken into account during the measurement data processing later on. In terms of practicability it gives the possibility to increase the measurement reach without the use of expensive telelens. This approach has successfully been used for inspection of the low-oil-content circuit breakers of the 4-rd power unit of Novovoronezhskaya atomic power plant.*

готовленном НПО "Платан". В 1990 г. был создан трёхканальный тепловизор с выходом на персональную ЭВМ.

В 1993 г. в ВЭИ разработаны и выпускались малыми партиями недорогие портативные (масса 330 г) теплоискатели – пирометры, предназначенные для дистанционного измерения локальных температур в диапазоне от –15 до 600°C. Использование линзового объектива собственной конструкции позволило обеспечить показатель визирования до 1:60.

Простая и надёжная конструкция приборов способствовала внедрению их в энергосистемах (Мосэнерго, Латвэнерго, Каббалкэнерго и др.). В 1995 г. приборы были отмечены золотой и серебряной медалями ВВЦ.

В настоящее время работа направлена на совершенствование тепловизоров и пирометров и разработку методов расчёта тепловых полей объектов.

В том случае, когда важно точно измерять температуру мелких деталей объекта, а телеобъектива нет, следует учитывать ограниченность разрешающей способности тепловизора [3,4]. Это удобно сделать с использованием функции передачи модуляции (ФПМ), которая в оптико-электронных приборах [5] описывает зависимость сигнала на выходе системы от пространственной частоты (ПЧ) (рис.1).

ПЧ  $f$  описывает размер элементов изображения исследуемого объекта: чем мельче структура этих элементов, тем выше ПЧ.

Характер ФПМ для различных тепловизоров может существенно отличаться. В основном это связано с качеством применяемых объектов. Некоторые наиболее солидные фирмы в паспортах

приводят ФПМ своих тепловизоров. Если нет – следует измерить её заранее и учитывать при практических измерениях. Согласно известной методике [6] нами были построены при помощи теплового тест-объекта со штриховыми излучателями возрастающей ПЧ ФПМ нескольких отечественных и зарубежных тепловизоров.

Рассмотрим график на рис.1. На нём показаны ФПМ тепловизоров с пировидиконами 1 и 2 (причём 2 использовался при измерениях на Нововоронежской АЭС) и с одноэлементным приёмником излучения 3. Если требуется измерить температуру малоразмерного объекта, которому, для примера, соответствует  $f = 0,5f_c$ , где  $f_c$  – граничная пространственная частота, воспроизводимая тепловизором, то сигнал от него будет почти в 3 раза меньше, чем от такого же, но крупного объекта, когда  $f < 0,1f_c$ .

Для пировидикона с числом строк 100 на такие объекты пришлось бы соответственно 2 и 10 строк.

Трёхкратное снижение сигнала соответствует кажущемуся снижению температуры объекта относительно фона также в 3 раза. Поэтому при анализе тепловых изображений для получения истинной температуры разность температур такого объекта и фона следует умножить на корректирующий коэффициент 3. По графикам аналогично можно определить корректирующие коэффициенты для любых других ПЧ.

Важно заметить, что для сканирующих тепловизоров с одноэлементными приёмниками (например, типа ИРТИС) снижение сигнала не такое существенное, поэтому пировидиконные тепловизоры постепенно вытесняются сканирующими и матричными.

Предложенная методика была использована в ходе измерений на Нововоронежской АЭС при

тепловизионном обследовании аппаратов высокого напряжения 15,75 кВ энергоблока № 4.

Обследовались: маломасляные выключатели типа ВГМ-20 генераторов МГ-20-ТГ-11 и МГ-20-ТГ-12. На аппаратах ВГМ-20 обследовались болтовые подсоединения к шинам 15,75 кВ.

Применявшаяся для обследования аппаратура:

– тепловизор портативный типа PORTAT-HERM 8010 (Англия), в комплекте, предварительно откалиброванный в лабораторных условиях (приёмник излучения – пировидикон типа 8090);

– видеоманитофон в комплекте;

– пирометр ВЭИ типа ПП1204.

Порядок проведения обследований аппаратов высокого напряжения:

– внешний осмотр аппаратов;

– осмотр аппаратов в ИК-спектре с помощью тепловизора;

– сплошная тепловая видеозапись болтовых подсоединений к шинам 15,75 кВ и других узлов выключателей, доступных для наблюдения через отверстия в корпусе;

– измерение пирометром температур мест перегревов, а также фоновых температур.

Проведена компьютерная обработка полученных результатов.

В результате проведенной работы получены тепловизионные цветные и черно-белые изображения, привязанные к температурной шкале; выявлены места наибольшего нагрева маломасляных выключателей – шины 15,75 кВ и болтовые контактные подсоединения к ним. В таблице указаны их температуры с учётом коэффициента излучения (коэффициент излучения для окисленной меди  $\epsilon = 0,65$ ) и реальной геометрической разрешающей способности тепловизора по описанной методике. Температуры пересчитаны на

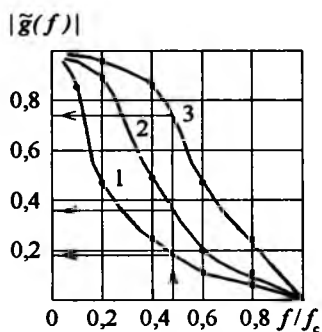


Рис.1. Экспериментальные ФПМ тепловизоров:

1 – с тонкоплёночным пировидиконном;  
2 – с английским пировидиконном типа 8090; 3 – с одноэлементным приёмником излучения

Температуры контактных соединений при номинальной нагрузке

Гене-ратор	Фаза	Номи-нальный ток, кА	$t, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{фон}}, ^\circ\text{C}$	Превышение температуры, $t - t_{\text{фон}}, ^\circ\text{C}$
МГ-20- ТГ-11	A	9,5	98	40	58
	B		83	40	43
	C		102	40	62
МГ-20- ТГ-12	A	9,5	128	45	83
	B		137	45	92
	C		109	45	64



Рис.2. Тест-объект для контроля геометрических параметров тепловизоров



Рис.4. Тепловизор ИРТИС с одноэлементным приёмником излучения

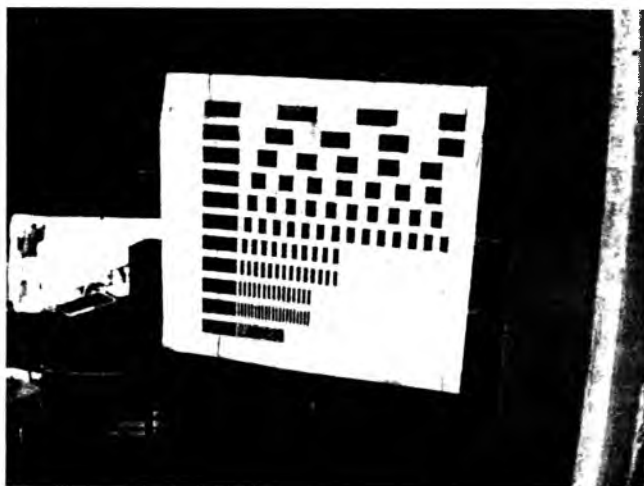


Рис.3. Тест-объект для измерения ФПМ

максимальную нагрузку по принятой методике [7]. Для болтовых контактных соединений из меди без покрытия, находящихся в воздухе, допустимым является нагрев менее 90°C и превышение над температурой фона менее 50°C.

Как видно из таблицы, большинство контактов в случае номинальной нагрузки генераторов ТГ-11 и ТГ-12 будут недопустимо перегреты. В связи с этим проведена ревизия контактных соединений при выводе оборудования в капитальный ремонт.

Точность измерений температур составил от  $\pm 5$  до  $\pm 10^\circ\text{C}$  в зависимости от диапазона. Быстродействие – 50 кадров в секунду.

### Выводы

1. За 50 лет в ВЭИ накоплен большой опыт разработки и применения приборов для инфракрасной диагностики электрооборудования.

2. Предложен способ уменьшения погрешности тепловизионных измерений удалённых мелкоструктурных объектов. Это позволяет фактически увеличить дальность действия тепловизора.

3. Предложенный способ успешно применялся при исследовании маломасляных выключателей энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС.

*Выражаю благодарность Ф.Б. Энгельбергу, В.И. Завадской и Б.И. Салманову за помощь в подготовке и оформлению результатов экспериментов на НВ АЭС.*

### Список литературы

1. Рубцов А.В., Хренников А.Ю. Контроль и диагностика электротехнического оборудования // Сб. материалов Конференции ТРАВЭК "Среднесрочная программа развития энергетики и электротехники" 17–18 мая 2006. С.146–151.
2. Овчаров И.В. Разработка и применение тепловизоров и пирометров ВЭИ // Сб. трудов международной конференции "Прикладная оптика – 98". С-Пб.: ГОИ, 1998.
3. Карлсен Г.Г., Овчаров И.В. К расчёту сканирующей системы для измерения тепловых полей высоковольтного оборудования // Тепловидение: Межотраслевой сб. науч. тр. М.: Моск. Гос. институт радиотехники, электроники и автоматики, 2000.
4. Абрамов О.И., Алмазов В.А., Комаров А.Н., Овчаров И.В. Построение тепловизионного устройства для исследования температурных полей полупроводниковой керамики // Прикладная физика. 2001. № 2.
5. ГОСТ 23935-79. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения.
6. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.
7. РД 34. 45-51. 300-97. Объём и нормы испытаний электрооборудования. М., 1998.

## Применение установок тиристорно-управляемой продольной компенсации на линиях электропередачи переменного тока

ИВАКИН В.Н., МАГНИЦКИЙ А.А., ШУЛЬГА Р.Н.

Рассмотрены характеристики установок тиристорно-управляемой продольной компенсации (ТУПК), применяемых для создания гибких (управляемых) линий электропередачи переменного тока. Показаны особенности внешних характеристик ТУПК и их влияние на диапазоны регулирования мощности, статическую и динамическую устойчивость. Дана оценка быстродействию ТУПК, показано влияние ТУПК на искажения форм кривых токов и напряжения. Продемонстрировано демп-

фирование колебаний активной мощности с помощью ТУПК.

*Characteristics TCSC on flexible AC transmission lines are considered. Characteristics of TCSC and their influence on ranges of regulation of capacity, static and dynamic stability are shown. The response time of TCSC and distortions of forms currents and voltages are given. It is shown power system oscillations with help of TCSC.*

Одним из возможных способов регулирования режимных параметров линии электропередачи (мощность, ток) является изменение ёмкостного сопротивления в установке продольной компенсации (УПК), включаемой последовательно в ЛЭП, т.е. применение управляемой УПК. Существуют различные схемы управляемых УПК, предполагающие ступенчатое (путём шунтирования секций конденсаторной батареи механическими или тиристорными ключами) или непрерывное (путём использования реакторов и управляемых тиристорных блоков) регулирование. Второй вариант реализации управляемой УПК получил название тиристорно-управляемая продольная компенсация (установки ТУПК) [1].

Первые установки ТУПК были созданы за рубежом при решении проблемы устранения субсинхронного резонанса, при котором нарастающие колебания вала турбоагрегата могут вызвать его повреждение. Это опасное явление проявлялось при работе электростанции через длинную ЛЭП с большой степенью продольной ёмкостной компенсации (более 50% сопротивления линии). Кроме этого, установки ТУПК, обеспечивающие автоматическое регулирование степени компенсации индуктивного сопротивления линии, позволяют решать задачи повышения пропускной способности линии электропередачи, демпфирования колебаний мощности в линии и качаний роторов генераторов после аварийных возмущений в энергосистеме, повышения устойчивости системы в послеаварийной ситуации, управления потоками мощности электропередачи и перераспределения потоков мощности по параллельным линиям электропередач.

К настоящему времени установки ТУПК нашли наибольшее применение в мире по сравнению с устройствами управляемой продольной компенсации других типов: на основе преобразователей с использованием полностью управляемых (запираемых) силовых полупроводниковых приборов (ПУСПП). Это связано, прежде всего, с простотой схемы установки и относительно низкой её стоимостью. Удельная стоимость установки ТУПК примерно в два раза выше, чем неуправляемой УПК, и примерно в два раза ниже УПК на ПУСПП. Тем не менее, проводятся исследования и разрабатываются схемы управляемых УПК на ПУСПП типа GTO, IGCT, IGBT и др., получивших в англоязычной литературе название Static Synchronous Series Compensator (SSSC) и SPFC (Series Power Flow Controller).

В общем случае установка ТУПК состоит из двух частей: нерегулируемой, представляющей собой конденсаторную батарею (КБ) с ёмкостью  $C_n$  и сопротивлением  $X_{Cn}$  и регулируемой, которая помимо КБ ёмкостью  $C_p$  и сопротивлением  $X_{Cp}$  включает реактор с индуктивностью  $L_p$  и тиристорную группу ТГ (рис.1). Ниже мы будем в основном рассматривать регулируемую часть уста-

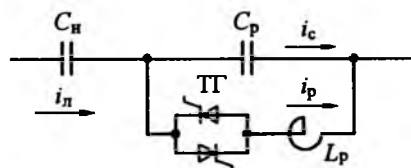


Рис.1. Упрощённая схема установки ТУПК, состоящая из нерегулируемой и регулируемой частей

новки ТУПК, поскольку применение нерегулируемой УПК эквивалентно уменьшению длины линии пропорционально степени компенсации такой установки.

Изменение эквивалентного сопротивления регулируемой части установки ТУПК обеспечивается управлением угла включения тиристорных вентилей. Диапазон изменения сопротивления – от

$$X_{TP_{\min}} = X_{Cp} f(\beta = 0) = X_{Cp} = \frac{1}{\omega C_p} \quad (\text{при полностью}$$

запертых вентилях) до  $X_{TP_{\max}} = X_{Cp} f(\beta = \beta_{\max})$ , где  $f(\beta)$  – функция относительного изменения эквивалентного сопротивления регулируемой части установки ТУПК от угла управления  $\beta$ , которая формируется на основе анализа токов и напряжений в схеме установки ТУПК на основной гармонике.

Как показано в [1], ток в реакторе установки ТУПК на интервале времени, когда тиристоры открыты, т.е. при  $\omega t = -\beta \div \beta$ , описывается выражением:

$$i_p(t) = I_m (A \cos \omega t - A \frac{\cos \beta}{\cos(K\beta)} \cos \omega_0 t), \quad (1)$$

где  $I_m$  – амплитуда тока ЛЭП;  $\beta$  – угол управления;  $\omega$ ,  $\omega_0$  – соответственно частота сети и собственная частота контура регулируемой части установки ТУПК;

$$A = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{L_p C_p}; \quad K = \frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{X_{Cp}}{X_p}};$$

$X_p = \omega L_p$  – индуктивное сопротивление реактора  $L_p$ .

Разложение формы тока в цепи реактора в ряд Фурье позволяет получить выражение для составляющей основной гармоники и определить эквивалентное сопротивление регулируемой части установки ТУПК:

$$X_{Tp}(\beta) = \frac{1}{\omega C_p} \left[ \frac{A}{\pi} (2\beta + \sin(2\beta)) - \frac{4A^2 \cos^2 \beta}{K^2 \pi} (K \operatorname{tg}(K\beta) - \operatorname{tg} \beta) - 1 \right]. \quad (2)$$

При построении систем управления часто используют угол  $\alpha$ , определённый как  $\alpha = \pi - \beta$ . При этом зависимость  $X_{Tp}$  от угла  $\alpha$  выглядит следующим образом:

$$X_{Tp}(\alpha) = \frac{1}{\omega C_p} \left[ \frac{A}{\pi} (2\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)) - \frac{4A^2 \cos^2 \alpha}{K^2 \pi} (K \operatorname{tg}(K(\pi - \alpha)) + \operatorname{tg} \alpha) - 1 \right]. \quad (3)$$

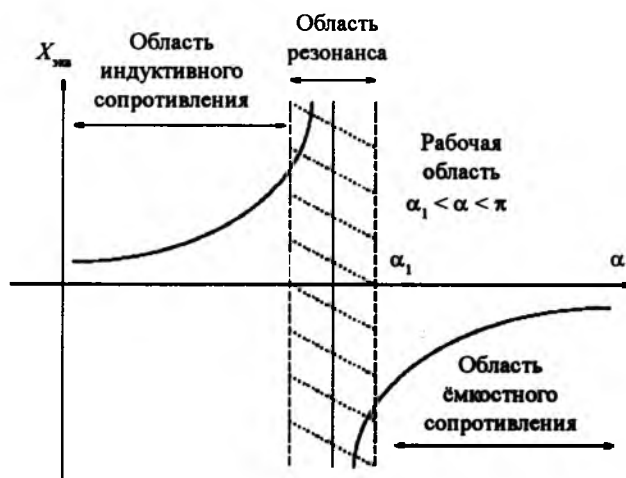


Рис.2. Зависимость эквивалентного сопротивления регулируемой части установки ТУПК от угла управления  $\alpha$

Зависимость изменения эквивалентного сопротивления от угла  $\alpha$   $X_{экв} = X_{Cp} f(\alpha)$  имеет вид, представленный на рис.2. Рабочая область, как правило, соответствует ёмкостному диапазону изменения сопротивления  $x_{\max} \geq x_{экв} \geq x_{\min}$ , соответствующему рабочему диапазону изменения угла управления  $\alpha_1 \leq \alpha \leq \pi$ .

Ток в ЛЭП определяется не только сопротивлением установки ТУПК, но и режимами примыкающих систем, аварийными режимами ЛЭП, поэтому внешняя характеристика установки ТУПК, отражающая область допустимых режимов работы оборудования, включая перегрузочные, имеет вид, представленный на рис.3,а. Внешнюю характеристику установки ТУПК часто удобнее представлять не в виде области значений  $U(I)$ , а в виде области  $X_{экв}(I)$ , имеющей вид, представленный на рис.3,б [2].

Если принять, что номинальное сопротивление (ёмкостное) регулируемой части установки ТУПК равно  $X_{TP(ном)}$ , а максимальное сопротивление (ёмкостное) –  $X_{TP(макс)}$ , то при индуктивном сопротивлении некомпенсированной ЛЭП, равном  $X_L$  номинальное значение коэффициента продольной компенсации, ЛЭП будет равно

$$s_{p(ном)} = \frac{X_{TP(ном)}}{X_L}, \quad \text{а максимальное значение}$$

$$s_{p(макс)} = \frac{X_{TP(макс)}}{X_L}. \quad \text{Общее сопротивление установ-$$

ки ТУПК будет изменяться от  $X_{T(\min)} = X_{Cn} + X_{Cp}$  до  $X_{T(\max)} = X_{Cn} + X_{Cp} f(\alpha = \alpha_{\max})$ .

Номинальный режим работы соответствует значению сопротивления установки ТУПК, находящегося в диапазоне

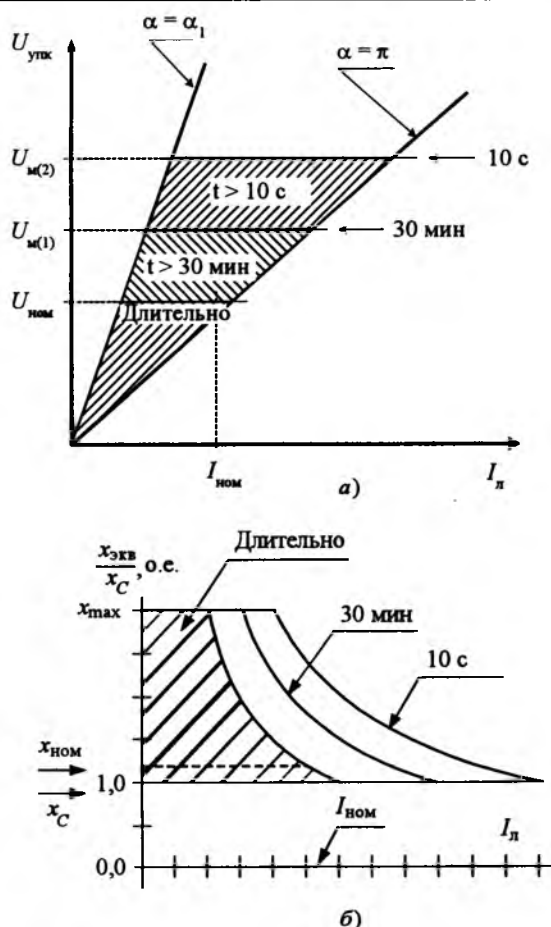


Рис.3. Внешние характеристики регулируемой части установки ТУПК

$$|X_{\tau(\min)}| < |X_{\tau(\text{н})} = X_{\text{сн}} + X_{\text{ср}} f(\alpha = \alpha_{\text{ном}})| < |X_{\tau(\max)}|$$

Соответственно, коэффициент компенсации ЛЭП будет изменяться от

$$s_{\kappa(\min)} = \frac{X_{\text{сн}} + X_{\text{ср}}}{X_{\text{л}}} = s_{\text{н}} + s_{\text{р}(\min)}$$

до

$$s_{\kappa(\max)} = \frac{X_{\text{сн}} + X_{\text{ср}} f(\alpha = \alpha_{\max})}{X_{\text{л}}} = s_{\text{н}} + s_{\text{р}(\max)},$$

где  $s_{\text{н}} = \frac{X_{\text{сн}}}{X_{\text{л}}}$  – коэффициент компенсации нерегулируемой части установки ТУПК.

Глубина регулирования коэффициента компенсации ЛЭП

$$m = \frac{s_{\kappa(\max)} - s_{\kappa(\min)}}{s_{\kappa(\min)}} = \frac{s_{\text{р}(\max)} - s_{\text{р}(\min)}}{s_{\text{н}} + s_{\text{р}(\min)}} = \frac{X_{\text{ср}} f(\alpha_{\max}) - X_{\text{ср}}}{X_{\text{сн}} + X_{\text{ср}}} = \frac{X_{\text{ср}} [f(\alpha_{\max}) - 1]}{X_{\text{сн}} + X_{\text{ср}}} = \frac{f(\alpha_{\max}) - 1}{\frac{X_{\text{сн}}}{X_{\text{ср}}} + 1}$$

Так как  $f(\alpha)$  изменяется от 1 при  $(\alpha = \pi)$  до

2,5 – 3 при  $(\alpha = \alpha_{\max})$ , то  $m = \frac{1,5 \div 2}{\frac{X_{\text{сн}}}{X_{\text{ср}}} + 1}$ . При

$\frac{X_{\text{сн}}}{X_{\text{ср}}} = 3 \div 5$   $m = 0,25 \div 0,5$ . В частности, для  $m =$

$= 0,5$  и  $f(\alpha_{\max}) = 3$  получаем  $\frac{X_{\text{сн}}}{X_{\text{ср}}} = 3$ .

Для установки ТУПК, состоящей из нерегулируемой части с сопротивлением  $X_{\text{сн}} = 3X_{\text{ср}}$  и регулируемой секции с диапазоном регулирования сопротивления  $\Delta X = 2X_{\text{ср}}$  (от  $X_{\text{ср}}$  до  $3X_{\text{ср}}$ ) суммарный регулировочный диапазон  $4X_{\text{ср}} \leq X_{\text{ТУПК}} \leq 6X_{\text{ср}}$ .

В зависимости от соотношений  $L_{\text{р}}$  и  $C_{\text{р}}$  в схеме установки ТУПК с учётом (2) угол  $\alpha_{\max}$  функции  $f(\alpha)$  будет разным. Чем выше значение

$K = \frac{\omega_0}{\omega}$ , тем больше значение угла управления

$\alpha_0$ , при котором наблюдается резонанс в схеме установки ТУПК, и, соответственно,  $\alpha_{\max}$ , что эквивалентно уменьшению рабочего диапазона углов регулирования установки ТУПК ( $\Delta\alpha$ ), особенно с учётом участка в области углов вблизи  $\alpha = \pi$ , в котором сопротивление установки ТУПК мало зависит от угла управления (рис.4).

Расчётные значения углов управления установки ТУПК ( $\beta$ ), диапазоны углов управления ( $\beta_1 - \beta_2$ ) для различных  $K$  в соответствии с (2), а также значения угла  $\alpha_0$  приведены в табл.1.

При полностью открытых тиристорах, как следует из выражения (3):

$$X_{\text{тр}} \left( \alpha = \frac{\pi}{2} \right) = X_{\text{ср}} \left[ \frac{A}{\pi} \pi - 1 \right] = X_{\text{ср}} [A - 1] = \\ = X_{\text{ср}} \left[ \frac{K^2}{K^2 - 1} - 1 \right] = X_{\text{ср}} \frac{1}{K^2 - 1}.$$

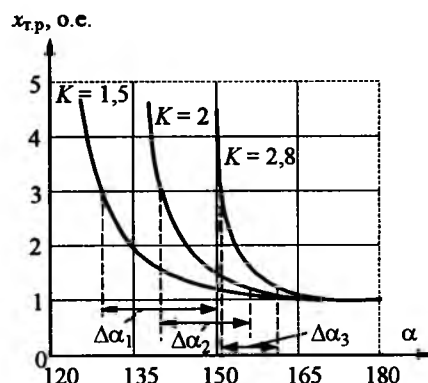


Рис.4. Зависимости эквивалентного сопротивления ( $X_{\text{тр}}$ ) регулируемой части установки ТУПК от угла управления  $\alpha$  для разных значений коэффициента  $K$



Таблица 1

Углы управления, град	K		
	1,5	2,0	2,8
$\beta_1(1,2X_C)$	31,1	25,0	19,5
$\beta_2(3X_C)$	50,8	39,1	28,8
$\Delta\beta(\Delta\alpha)$	19,7	14,1	8,3
$\alpha_0$	120,0	135,0	147,9

Таким образом, при увеличении  $K$  и полностью открытых тиристорах ( $\alpha = \pi/2$ ) сопротивление регулируемой части установки ТУПК  $X_{TP}$  снижается.

Учитывая, что  $K^2 = X_{Cp}/X_p$ , то выбрав  $K$ , можно найти  $X_p$  или  $L_p$  в схеме установки ТУПК.

Характеристика передаваемой активной мощности ЛЭП с устройством установки ТУПК имеет вид, представленный на рис.5, и определяется выражением

$$P_n = \frac{V^2}{X_n(1-s)} \sin \delta, \quad (4)$$

где  $s = X_T/X_n$  – коэффициент компенсации.

Как видно на рис.5, если режим передачи предельной мощности  $P_{np1}$  при отсутствии установки ТУПК ( $s = 0$ ), определяемый требуемым запасом статической устойчивости, обеспечивается при угле  $\delta_{np}$ , то при наличии установки ТУПК (в частности, для  $s = 0,333$ ), этот режим обеспечивается при угле  $\delta_1 < \delta_{np}$ , характеризующимся существенно большим запасом устойчивости. Если тепловой предел по ЛЭП определяется мощностью  $P_T$ , которая больше, чем  $P_{np1}$ , то установка установки ТУПК может обеспечить максимальное использование пропускной способности такой ЛЭП.

Таким образом, увеличение коэффициента компенсации ЛЭП при передаче одной и той же мощности  $P_n$  приводит к уменьшению угла  $\delta$ , т.е. увеличению запаса устойчивости. Одновременно видно, что работа ЛЭП с заданным запасом устойчивости, характеризующимся предельным значением угла  $\delta$ , соответствует увеличению предельной передаваемой мощности за счёт повышения коэффициента компенсации. Быстродействующее управление коэффициентом компенсации в аварийных и послеаварийных режимах позволяет обеспечить требуемую устойчивость системы с учётом перегрузочных возможностей установки ТУПК.

Кроме эффекта повышения статической и динамической устойчивости электропередачи, не менее важным является и эффект увеличения устойчивости нагрузки по напряжению при приме-

$P$ , о.е.

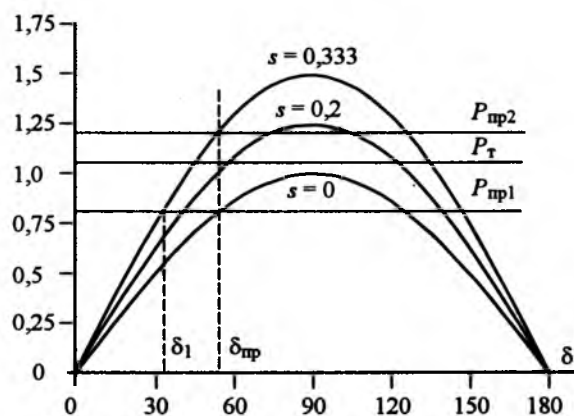


Рис.5. Характеристика передаваемой активной мощности ЛЭП с ТУПК

нению установки ТУПК. Оценка этого эффекта может быть сделана на основе анализа известной формулы определения напряжения в конце ЛЭП:

$$U_2 = \sqrt{\left( U_1 - \frac{P_1 r_n + Q_1 x_n}{U_1} \right)^2 + \left( \frac{P_1 x_n - Q_1 r_n}{U_1} \right)^2}, \quad (5)$$

которая при  $r = 0$  и чисто активной нагрузке (полная компенсация реактивной мощности нагрузки в конце ЛЭП) и при коэффициенте продольной компенсации реактанса линии  $s$  имеет вид

$$P_* = \frac{P}{P_0} = U_{2*} \sqrt{(1 - U_{2*}^2) / (1 - s)}, \quad (6)$$

где  $U_{2*} = \frac{U_2}{U_1}$ ,  $P_0 = \frac{U_1^2}{x_n}$ .

Зависимость (6) представлена на рис.6.

Как видно из рис.6, при одной и той же мощности нагрузки  $P_{n1}$ , отклонение напряжения при установке в линию установки ТУПК существенно меньше, чем при отсутствии установки ТУПК.

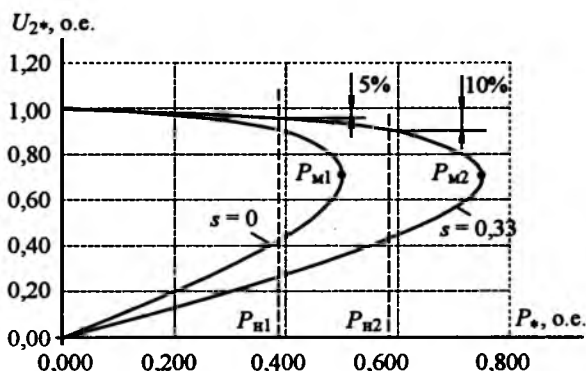


Рис.6. Зависимость напряжения в конце ЛЭП от активной мощности нагрузки

Кроме того, максимум мощности нагрузки при наличии продольной компенсации ЛЭП существенно выше. Таким образом, установка в ЛЭП УПК повышает устойчивость нагрузки по напряжению и снижает опасность лавины напряжения при росте нагрузки.

Анализ влияния параметра  $K = \frac{\omega_c}{\omega} = \sqrt{\frac{X_{Cp}}{X_p}}$  на

такие характеристики установки ТУПК, как быстродействие и гармонический состав токов и напряжений в ЛЭП при одном и том же регулировочном диапазоне ТУПК проводился на цифровой модели установки ТУПК, включённой в середину линии передачи. Расчёты проводились для установки ТУПК, состоящей только из регулируемой части. Принято, что примыкающие системы – бесконечной мощности и промежуточные отборы мощности на линии отсутствуют. Принято также, что номинальный режим работы установки ТУПК соответствует значению эквивалентного сопротивления установки  $X_{экв} = 1,2X_{Cp}$ , а регулировочный диапазон установки ТУПК соответствует изменению сопротивления от  $1,2X_{Cp}$  до  $3X_{Cp}$ , что соответствует для данной расчётной модели изменению степени компенсации от 6,5 до 16,1%.

Для определения зависимости быстродействия установки ТУПК от исходного режима (начального сопротивления установки) задавались скачкообразные изменения угла управления, при которых сопротивление установки изменялось сначала в сторону увеличения, а затем в сторону уменьшения с шагом  $\Delta X_{Tp} = \frac{1}{3}(3X_{Cp} - 1,2X_{Cp}) = 0,6X_{Cp}$ . Под быстродействием понимается длительность переходного процесса с выходом на новый установившийся режим при скачкообразном изменении угла управления.

На рис. 7 показана осциллограмма изменения

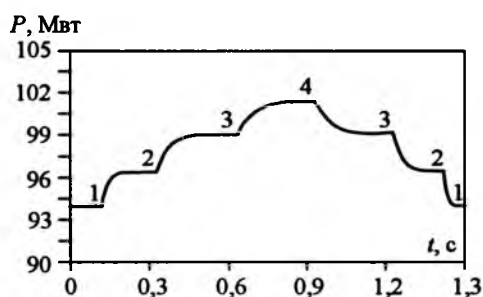


Рис. 7. Осциллограмма изменения активной мощности в линии с ТУПК при ступенчатом изменении угла управления:

1 –  $X_{Tp} = 1,2X_{Cp}$ ; 2 –  $X_{Tp} = 1,8X_{Cp}$ ; 3 –  $X_{Tp} = 2,4X_{Cp}$ ; 4 –  $X_{Tp} = 3X_{Cp}$

активной мощности в линии передачи, полученная в результате этого расчёта. Видно, что быстродействие установки ТУПК в значительной степени зависит от исходного сопротивления  $X_{Tp}$ , а также от того, в какую сторону (увеличения или уменьшения сопротивления) направлен процесс. Чем ближе исходное значение  $X_{Tp}$  к верхней границе диапазона регулирования ( $3X_{Cp}$ ), тем ниже быстродействие установки. Это объясняется тем, что увеличение сопротивления установки ТУПК связано с приближением к точке резонанса токов в контуре и влиянием на быстродействие процесса добротности этого контура. При этом быстродействие установки ТУПК в процессе уменьшения сопротивления выше, чем в процессе увеличения. Постоянные времени переходного процесса при повышении сопротивления установки ТУПК составляют для каждого шага изменения сопротивления  $\Delta X_{Tp}$  примерно 0,03, 0,06, 0,1 с, а при уменьшении сопротивления установки ТУПК, соответственно, 0,07, 0,04, 0,015 с.

Как показали результаты расчётов, быстродействие установки ТУПК практически не зависит от значения параметра  $K$ . В то же время, расчёты показывают, что для одной и той же установки ТУПК при уменьшении длины линии передачи и, соответственно, с ростом степени компенсации расширяется регулировочный диапазон установки ТУПК и снижается её быстродействие, т.е. чем ближе сопротивление установки ТУПК к режиму полной компенсации продольного сопротивления, тем ниже быстродействие установки ТУПК.

Гармонический состав тока в линии, в которую включена установка ТУПК, определяются в основном длиной ЛЭП и мощностью КЗ примыкающих систем. Расчёты показывают, что уровень гармоник, генерируемый установкой ТУПК, невелик и не требует установки дополнительных фильтров. Это связано прежде всего с тем, что частотная характеристика компенсированной линии в диапазоне до 10-й гармоники имеет индуктивный характер и её сопротивление увеличивается с ростом частоты, в то время как сопротивление КБ регулируемой части установки ТУПК, шунтирующей источник гармоник, с ростом частоты резко уменьшается, что, в целом, существенно улучшает фильтрацию гармоник тока в самой схеме установки ТУПК, препятствуя распространению гармоник тока в линию передачи.

Расчётные осциллограммы форм кривых токов

и напряжений установки ТУПК при  $K = 1,5$ ,  $K = 2,0$  и  $K = 2,8$  и углах управления, соответствующих сопротивлению регулируемой части установки ТУПК  $X_{ТР} = 3X_{Ср}$  приведены на рис.8, а результаты гармонического анализа форм кривых токов и напряжений для выполненных расчётов – в табл.2, где даны максимальные значения токов линии и ветвей установки ТУПК, напряжений на КБ установки ТУПК для гармоник с 1 по 13 включительно, а также коэффициенты искажения синусоидальности токов и напряжений при  $X_{ТР} = 1,2X_{Ср}$  и  $X_{ТР} = 3X_{Ср}$ .

Анализ показывает, что искажения форм кривых токов и напряжений растут с ростом  $K$ , а для одного и того же  $K$  искажения растут с ростом сопротивления установки. При этом для больших значений  $K$  характерно увеличение амплитуд мгновенных значений токов КБ установки ТУПК и тиристорно-реакторной группы. Искажения форм кривых токов в линии очень малы. Искажения форм кривых напряжений на установке ТУПК более заметны, особенно с ростом  $X_{ТР}$ . Коэффициент искажения синусоидальности фазного напряжения на шинах подключения установки ТУПК для установок с различными  $K$  и линий различной длины при  $X_{ТР} = 1,2X_{Ср}$  не превышает 0,35%, а при  $X_{ТР} = 3X_{Ср}$  – не превышает 1%.

Таким образом, проведённые на цифровой модели исследования показали, что соотношения

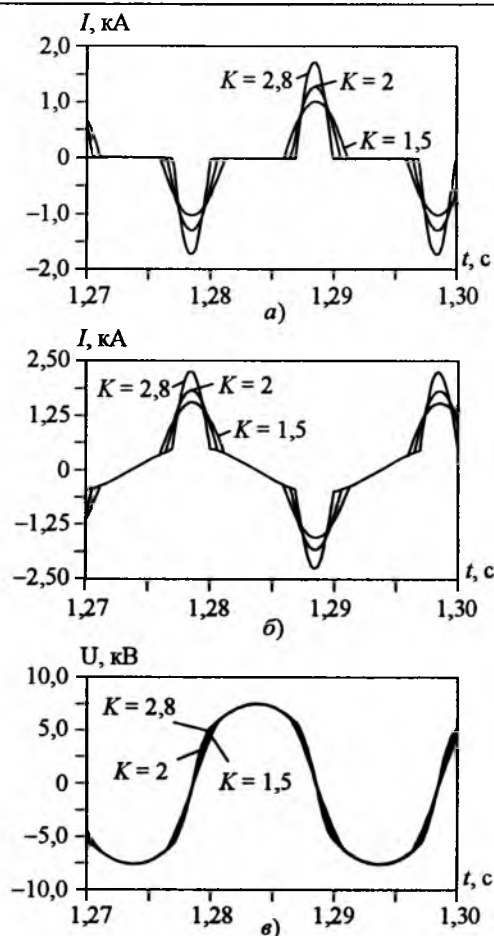


Рис.8. Расчётные осциллограммы форм кривых токов и напряжений ТУПК при различных значениях  $K$  и углах управления, соответствующих сопротивлению регулируемой части ТУПК  $3X_{Ср}$ :

$a$  – ток реактора ТУПК;  $b$  – ток КБ ТУПК;  $c$  – напряжение на КБ ТУПК

Таблица 2

	$n$	$K = 1,5$				$K = 2$				$K = 2,8$			
		$I_n$	$I_p$	$I_{ср}$	$U_{ТР}$	$I_n$	$I_p$	$I_{ср}$	$U_{ТР}$	$I_n$	$I_p$	$I_{ср}$	$U_{ТР}$
$I_n$ ( $U_n$ ), %	1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	3	0,1 (0,3)	78,4 (50,9)	13,3 (34,0)	4,5 (11,3)	0,1 (0,4)	85,9 (68,4)	14,0 (45,8)	4,7 (15,2)	0,1 (0,5)	91,1 (81,7)	15,4 (55,1)	5,2 (18,3)
	5	– (0,1)	45,2 (3,8)	7,6 (2,5)	1,5 (0,4)	– (0,1)	61,8 (26,5)	10,0 (17,8)	2,0 (3,5)	– (0,1)	75,1 (52,4)	12,6 (35,2)	2,5 (7,0)
	7	– (0,45)	14,2 (7,8)	2,3 (5,0)	0,3 (0,8)	0,1 (0,1)	34,8 (1,5)	5,5 (1,0)	0,7 (0,2)	0,3 (1,3)	54,9 (22,7)	9,1 (15,0)	1,2 (2,1)
	9	–	4,2 (0,5)	0,7 (0,3)	0,1 (0,1)	–	11,7 (7,7)	1,9 (5,2)	0,2 (0,6)	–	34,0 (1,9)	5,7 (1,3)	0,1 (0,1)
	11	–	8,4 (2,8)	1,4 (1,8)	0,1 (0,2)	–	3,0 (1,7)	0,5 (1,2)	0,1 (0,1)	–	15,6 (7,1)	2,6 (4,8)	0,2 (0,4)
	13	–	3,3 (1,0)	0,7 (0,7)	–	–	8,3 (3,1)	1,4 (2,0)	0,1 (0,2)	–	2,1 (6,1)	0,4 (4,1)	0,1 (0,3)
$K_{ис}$ , %		0,26 (0,6)	92,3 (51,7)	15,6 (34,6)	4,7 (11,4)	0,3 (0,48)	112,8 (73,9)	18,3 (49,4)	5,2 (15,6)	0,4 (1,45)	136,2 (100,3)	22,9 (67,4)	5,9 (19,8)

Примечания. В скобках – значения для  $X_{ТР} = 3X_{Ср}$ ;  $I_n$  – ток в линии, в которую включена ТУПК;  $I_p$  – ток реактора ТУПК;  $I_{ср}$  – ток конденсаторной батареи ТУПК;  $U_{ТР}$  – напряжение КБ ТУПК;  $n$  – номер гармоники;  $I_n$  ( $U_n$ ) – ток (напряжение)  $n$ -й гармоники по отношению к току (напряжению) 1-й гармоники, %;  $K_{ис}$  – коэффициент искажения синусоидальности формы кривой тока (напряжения), %.

параметров установки ТУПК мало влияют на быстроедействие установки, которое в свою очередь зависит от направления процесса изменения сопротивления, исходного сопротивления установки ТУПК и длины линии, в которую включена установка. Изменение соотношений параметров установки ТУПК практически не влияет на искажения формы кривой напряжения в узлах включения установки и мало влияет на искажения формы кривой тока в линии. В тоже время от соотношений параметров установки ТУПК сильно зависят искажения формы кривых токов и максимальные токи КБ ТУПК и тиристорно-реакторной группы.

Рассмотрим влияние установки ТУПК на демпфирование колебаний активной мощности в линии передачи. На рис.9 показана расчётная схема, в которой установка ТУПК, состоящая из регулируемой и нерегулируемой частей, включена в одноцепную линию передачи 500 кВ длиной 400 км, соединяющую систему с мощностью КЗ 10 ГВ·А с эквивалентным синхронным генератором номинальной мощностью 1500 МВт. Степень компенсации нерегулируемой части 30% индуктивного сопротивления линии, а регулировочный диапазон регулируемой части – от 7,8 до 19,6%. Общий коэффициент компенсации установки ТУПК изменяется от 37,8 до 49,6% сопротивления линии, что позволяет при изменении

сопротивления регулируемой части установки ТУПК во всём регулировочном диапазоне регулировать передаваемую по линии 500 кВ активную мощность в диапазоне примерно 10% передаваемой.

Параллельно линии 500 кВ через согласующие трансформаторы подключена двухцепная линия 220 кВ той же длины. Возмущения в системе вызывались трёхфазными КЗ на одной цепи линии 220 кВ в её начале с последующим отключением и АПВ. Расчёты проводились при допущениях, что вращающий момент на валу и напряжение возбуждения эквивалентного синхронного генератора (ЭСГ) неизменны, промежуточные отборы мощности и шунтовые компенсирующие устройства отсутствуют. Расчёты проводились для случаев отсутствия и наличия регулирования установки ТУПК в полном ( $1,2X_{Cp} - 3X_{Cp}$ ) и в половинном ( $1,2X_{Cp} - 2,1X_{Cp}$ ) диапазонах. В качестве номинального режима работы установки ТУПК принят режим при сопротивлении регулируемой части установки ТУПК, соответствующему нижней границе регулировочного диапазона (7,8 % индуктивного сопротивления линии), при котором мощность регулируемой части установки ТУПК соответствует примерно 60 Мвар (6% передаваемой по линии активной мощности). При сопротивлении установки ТУПК, соответствующем верхней границе диапазона регулирования

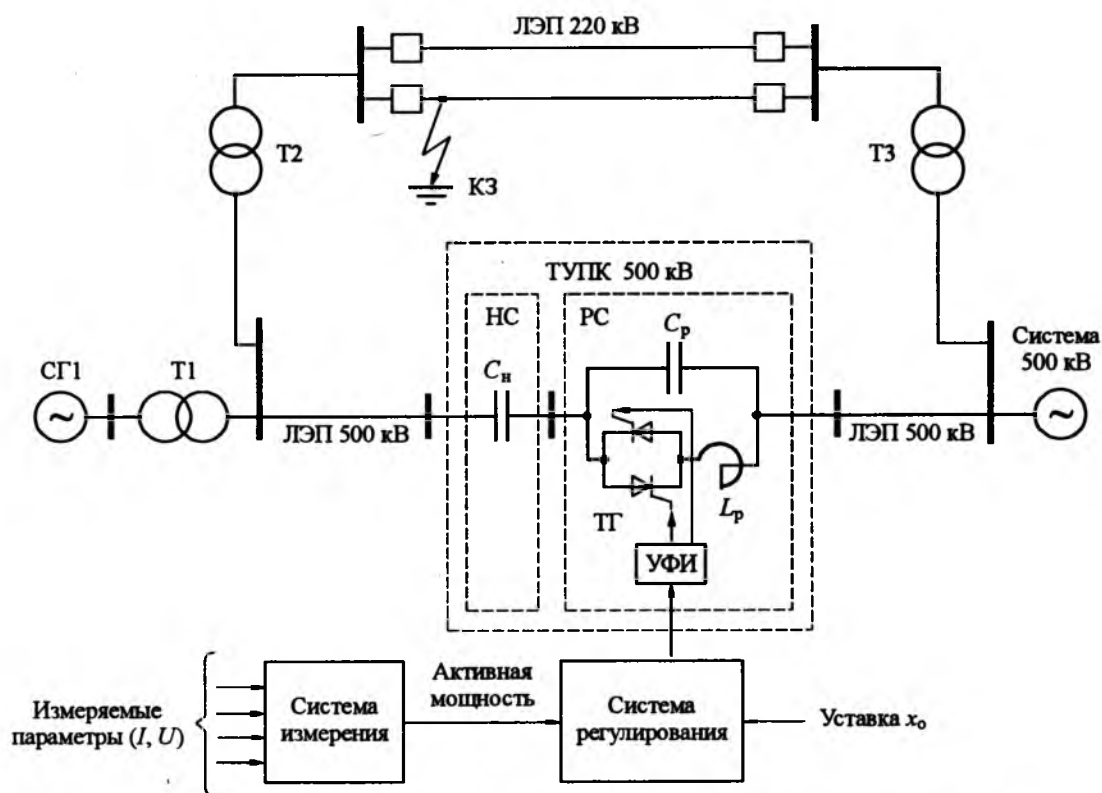


Рис.9. Расчётная схема для исследования демпфирования колебаний мощности с помощью ТУПК

( $3X_{Cp}$  или 19,6% сопротивления ЛЭП), мощность регулируемой части установки ТУПК составляет примерно 180 Мвар или 18% передаваемой по линии активной мощности, при сопротивлении установки ТУПК  $2,1X_{Cp}$ , т.е. при сокращении регулировочного диапазона вдвое, – 115 Мвар или 11,5% передаваемой активной мощности.

Для всех вариантов расчётов принята длительность КЗ 0,12 с, а длительность паузы АПВ  $t_{АПВ} = 1,2$  с.

Рассматривались два способа управления установкой ТУПК при возникновении качаний мощности в ЛЭП. Первый – поддержание постоянства сопротивления установки ТУПК в течение всего времени расчёта. Второй – изменение сопротивления установки ТУПК в соответствии с отклонением активной мощности в линии 500 кВ. Регулирование осуществлялось по замкнутому контуру.

На рис.10 показаны расчётные осциллограммы

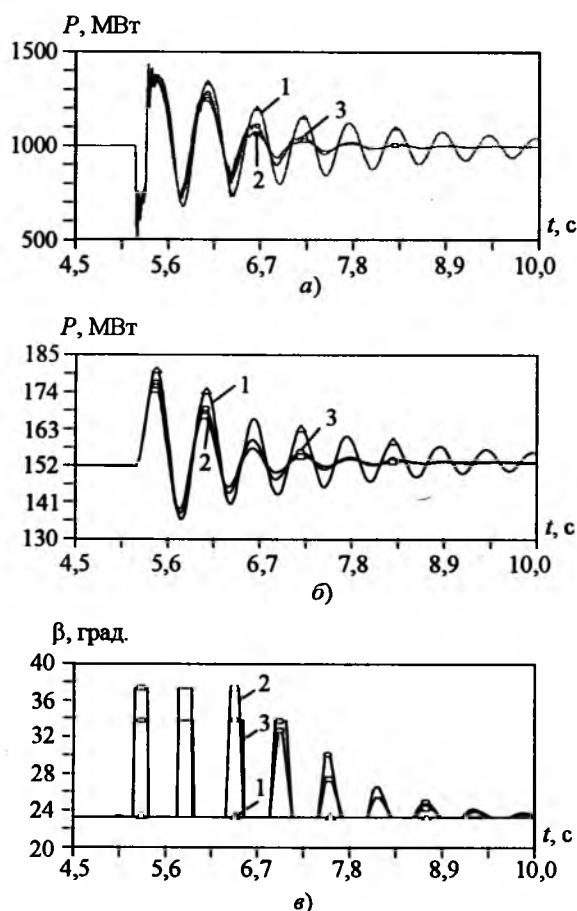


Рис.10. Расчётные осциллограммы демпфирования колебаний мощности с помощью ТУПК:

а – активная мощность в линии 500 кВ; б – угол ротора генератора; в – угол управления  $\beta$  ТУПК; 1 – регулирование ТУПК отсутствует; 2 – регулирование ТУПК в полном диапазоне ( $2,1X_{Cp} - 3X_{Cp}$ ); 3 – регулирование ТУПК в половинном диапазоне ( $1,2X_{Cp} - 2,1X_{Cp}$ )

мы для описанных случаев. Кривые 1 соответствуют отсутствию регулирования установки ТУПК, кривые 2 и 3 – наличию регулирования соответственно в полном и половинном диапазонах. На рисунках приведены расчётные осциллограммы активной мощности в линии 500 кВ, угла ротора эквивалентного синхронного генератора, активной мощности в линии 220 кВ и угла управления установкой ТУПК. При отсутствии регулирования установки ТУПК в линии 500 кВ возникают колебания активной мощности частотой примерно 1,8 Гц. Максимальная амплитуда колебаний приходится на период паузы АПВ, отклонение мощности в линии от установившегося значения в предаварийном режиме достигает 35–40%. За период времени примерно 3 с с момента КЗ амплитуда колебаний снижается втрое. При наличии регулирования установки ТУПК как в полном, так и в половинном диапазоне за тот же период времени амплитуда колебаний активной мощности снижается соответственно до 1–2% передаваемой мощности. Из расчётных осциллограмм видно, что регулирование установки ТУПК позволяет не только снизить амплитуду колебаний мощности в той линии, в которую включена установка, но и существенно сократить длительность качаний мощности в ЛЭП с ТУПК, а также качаний ротора генератора и колебаний мощности в параллельной линии 220 кВ.

## Выводы

Применение на линиях передачи установок ТУПК является эффективным способом повышения передаваемой мощности и устойчивости линии передачи. ТУПК позволяет снизить амплитуду и длительность качаний мощности в ЛЭП, причём демпфирующий эффект установки ТУПК проявляется и на линиях передачи, включённых параллельно. Искажения токов в схеме установки ТУПК не приводят к искажениям токов в линии передачи, в которую включена установка ТУПК, и напряжений в узлах включения установки, что позволяет обойтись без применения фильтров.

## Список литературы

1. Ивакин В.Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсации как устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередачи переменного тока // *Электротехника*. 2003. № 6.
2. Ивакин В.Н. Внешние характеристики устройств гибких передач переменного тока и их влияние на характеристики мощности управляемых линий электропередачи переменного тока // *Электротехника*. 2005. № 12.

# СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

## Микропроцессорная система автоматического управления опытами в лабораториях больших мощностей

ПЕТЕРСОН А.Л., БЫСТРУЕВ А.К., ЛЯДВИНСКИЙ И.Е., КОНДРЫЧИН Э.В.,  
НОСИК Л.П., СОБАКАРЬ Т.В.

*Приведены результаты разработки и внедрения прибора автоматического управления опытами в лабораториях больших мощностей. Прибор основан на современной микропроцессорной системе и включает в себя инженерную станцию, микропроцессорное управляющее устройство и панель силовой коммутации. Прибор имеет дополнительную функцию, обеспечивающую цифровую запись токов и напряжений в испытательной схеме.*

*Results of development and introduction of the device for automatic control of tests in High Power Laboratories are presented. The device is based on the modern microprocessor system and includes engineering station, the microprocessor processing device and the panel of power commutations. The device has the additional function providing digital record of currents and voltage in the test circuit.*

Лаборатории больших мощностей проводят разнообразные экспериментальные исследования и испытания оборудования высокого напряжения. Это, прежде всего, испытания выключателей на коммутационную способность, на стойкость при сквозных токах КЗ, на коммутационную износостойкость и др. При этих испытаниях используются установки с ударными генераторами [1].

Ударный генератор имеет большое число вспомогательной аппаратуры (включающие аппараты, защитные выключатели, осциллографы и т. п.). Аппаратура должна включаться и отключаться в строго определённой последовательности по времени, причём моменты подачи импульсов на срабатывание отдельных элементов должны быть синхронизированы с напряжением ударного генератора.

Интервалы времени между отдельными операциями должны регулироваться с точностью до 0,01 с с разбросом, не превышающим тысячных долей секунды. В ряде случаев (например, управление включающим аппаратом и осциллографом) требуется ещё большая точность подачи импульсов (до 0,001 с).

Лаборатории больших мощностей, как правило, оснащаются синтетической установкой. При этом возникает необходимость синхронизировать работу ударного генератора и предварительно заряжаемой конденсаторной батареи с точностью до нескольких микросекунд.

Применяемые до настоящего времени приборы автоматического управления опытами [2–4] выполнены на устаревшей элементной базе. Поэтому возникла необходимость создания системы автоматического управления опытами на современной микропроцессорной базе.

Применение микропроцессорного устройства для управления опытом обеспечивает возможность гибкого задания условий опыта, высокую точность измерения временных интервалов, визуализацию процессов, происходящих во время опыта, удобство работы в процессе эксплуатации и, в конечном счёте, повышение качества испытаний.

Микропроцессорная система автоматического управления опытами (в дальнейшем система) выполняет две функции:

– основную: обеспечивает подачу в требуемой последовательности серии импульсов (команд) заданной длительности от внешнего источника постоянного напряжения на срабатывание аппаратов и приборов в испытательных, измерительных и вспомогательных цепях;

– дополнительную: даёт возможность цифровой записи (осциллографирования) мгновенных значений низкочастотных сигналов тока и напряжения испытательной схемы в процессе проведения опыта.

На рис.1 представлена структурная схема микропроцессорной системы автоматического управления опытом.

Система включает в себя следующие устройства:

- инженерную станцию (ИС) (персональный компьютер);
- микропроцессорное управляющее устройство (МПУ);
- панель силовой коммутации (ПСК).

Инженерная станция предназначена для взаимодействия с МПУ как на этапе подготовки к опыту (формирование, запись в МПУ и хранение файла конфигурирования), так и в процессе

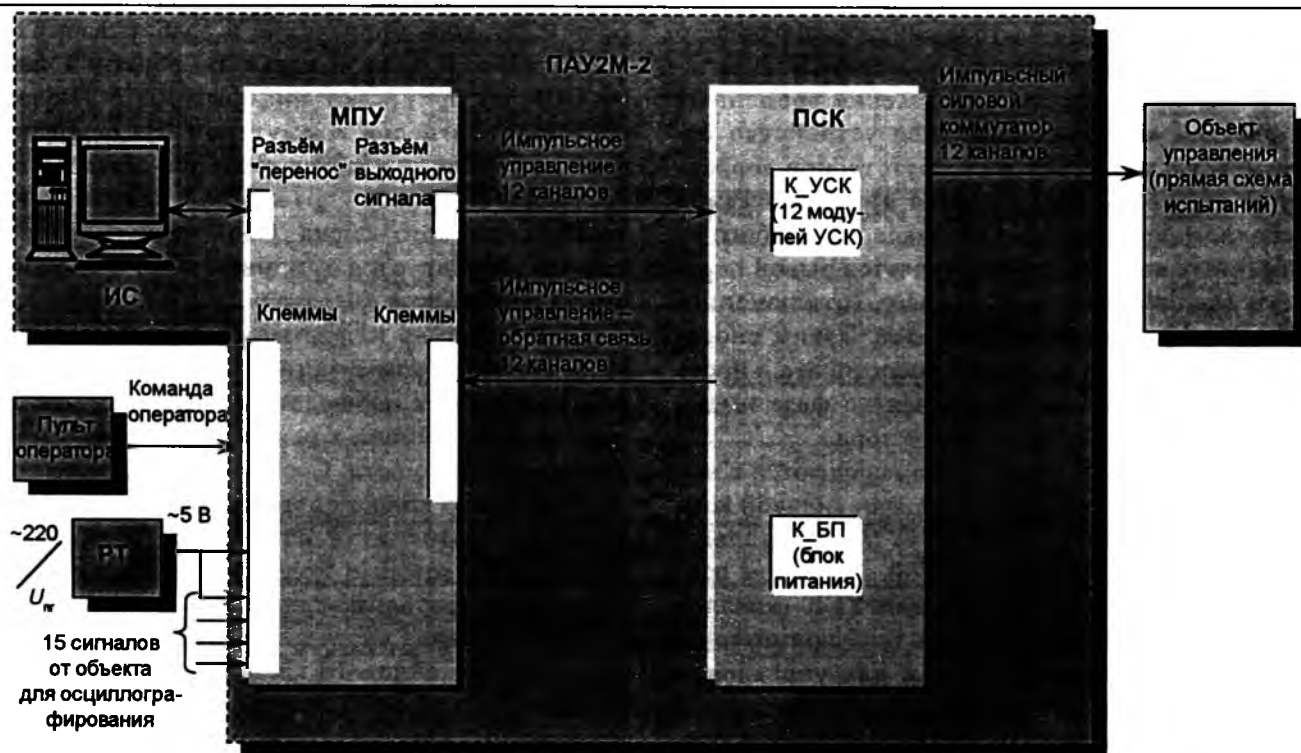


Рис.1. Структурная схема системы автоматического управления опытом ПАУ2М-2 стенд ТИ-12:

ИС – инженерная станция; РТ – развязывающий трансформатор; МПУ – микропроцессорное управляющее устройство; ПАУ2М-2 – прибор автоматического управления опытом; ПСК – панель силовой коммутации

испытаний, а также для анализа и отображения результатов опыта.

**Микропроцессорное управляющее устройство** [5] реализует заданную последовательность импульсов управления, осциллографирует в процессе опыта импульсы управления и мгновенные значения сигналов тока и напряжения, заданные в конфигурации, а также переносит регистры в ИС для их отображения.

**Панель силовой коммутации** содержит 12–24 устройств силовой коммутации (УСК), управляемых через МПУ напряжением пилот-генератора или электрической сети и до 4 устройств, управляемых током КЗ схемы испытаний.

Ниже описывается работа системы в процессе проведения опыта. Опыт выполняется в три этапа.

1. Пользователь создаёт на ИС нужную конфигурацию и записывает ее в МПУ. Конфигурация содержит задание для микропроцессорного устройства на выдачу серии команд в схему испытания и задание на осциллографирование в процессе опыта.

Пользователь выбирает нужные каналы управления (может быть задано любое сочетание номеров каналов), задает время начала и длительность команды (в каждом канале от 1 до 4 команд). При этом надо иметь в виду, что длительность импульса может быть в пределах

10 мс – 40 с, а общее время от переднего фронта первого импульса до заднего фронта последнего не должно превышать 40 с.

Для осциллографирования в процессе опыта пользователь выбирает каналы (от одного до 15 каналов) и задаёт параметры регистрации. Пользователь может использовать внешние осциллографы, например для записи высокочастотных сигналов, в этом случае их запуск осуществляется через имеющиеся каналы управления.

В дальнейшем файл конфигурирования хранится на ИС.

2. Перед проведением опыта оператору выдается сообщение о готовности МПУ к опыту: подключено синхронизирующее напряжение, записан файл конфигурации. В качестве синхронизирующего напряжения система, помимо напряжения электрической сети, может принимать сигнал от аналогового или импульсного пилот-генератора (выбирается тумблером).

Опыт начинается по команде оператора и заканчивается автоматически после срабатывания всех заданных каналов, либо ранее – при нештатной работе системы или по команде оператора.

После получения команды оператора МПУ ожидает перехода через ноль синхронизирующего напряжения, фиксирует начало опыта и начало отсчёта времени в полупериодах и двухградусных интервалах.



В процессе опыта частота синхронизирующего напряжения может существенно меняться. Для исключения погрешности определения временных интервалов микропроцессорное устройство отслеживает его частоту и соответственно корректирует двухградусный интервал. При достижении очередного временного интервала для любого из выбранных каналов осуществляется вывод переднего (включение) или заднего (отключение) фронтов управляющего импульса. Таким способом формируется заданная последовательность импульсов, синхронизированная по фазе и частоте с сигналом от пилот-генератора.

Далее импульсы управления передаются в модули УСК, расположенные в панели силовой коммутации ПСК. Устройства МПУ и УСК гальванически развязаны между собой с уровнем изоляции 3 кВ. На выходе модулей УСК (каналов управления) формируется выходной прямоугольный коммутационный импульс для управления силовыми коммутационными аппаратами – оперативное напряжение 110/220 В (выбирается тумблером для каждого канала), ток нагрузки до 30 А, нагрузка индуктивная. Для силовой коммутации используется IGBT транзистор.

Одновременно по факту начала опыта МПУ начинает выполнять цифровую запись в память состояния сигналов коммутации и мгновенных значений сигналов тока и напряжения, заданных конфигурацией. Регистрация (осциллографирование) заканчивается автоматически по окончании опыта.

В процессе опыта МПУ осуществляет конт-

роль импульсов управления и срабатывания силовых ключей. С этой целью по обратной связи от ПСК он принимает информацию о текущем состоянии сигналов коммутации. На основании этой информации ведётся контроль соответствия состояния импульса управления и состояния выходного силового ключа. Сбой работы силовых ключей фиксируется в памяти и по окончании опыта сообщается оператору.

Одновременно информация о текущем состоянии сигналов коммутации передается на ИС, и оператор может наблюдать на экране монитора прохождение команд в режиме реального времени проведения опыта. Состояние выходного коммутационного ключа оператор может наблюдать также по светодиодам на лицевых панелях модулей УСК, которые подсвечиваются на время замкнутого состояния ключа.

Каждый канал управления (УСК) имеет защиту выходного силового ключа от КЗ в нагрузке, настроенную на 5–35 А, и защиту от наводимой противоЭДС в индуктивной нагрузке (1,5 кВ). О срабатывании защиты по КЗ в цепи нагрузки сигнализирует светодиод на лицевой панели УСК.

3. Завершается опыт после срабатывания всех выбранных каналов управления. При выявлении сбоя контроллера МПУ, пропадании синхронизирующего напряжения или снятия команды оператором опыт завершается досрочно. В этом случае МПУ прекращает вывод управляющих импульсов и выдает сигнал на размыкание всех силовых ключей, работающих в данном опыте. Окончание опыта сопровождается сообщением на

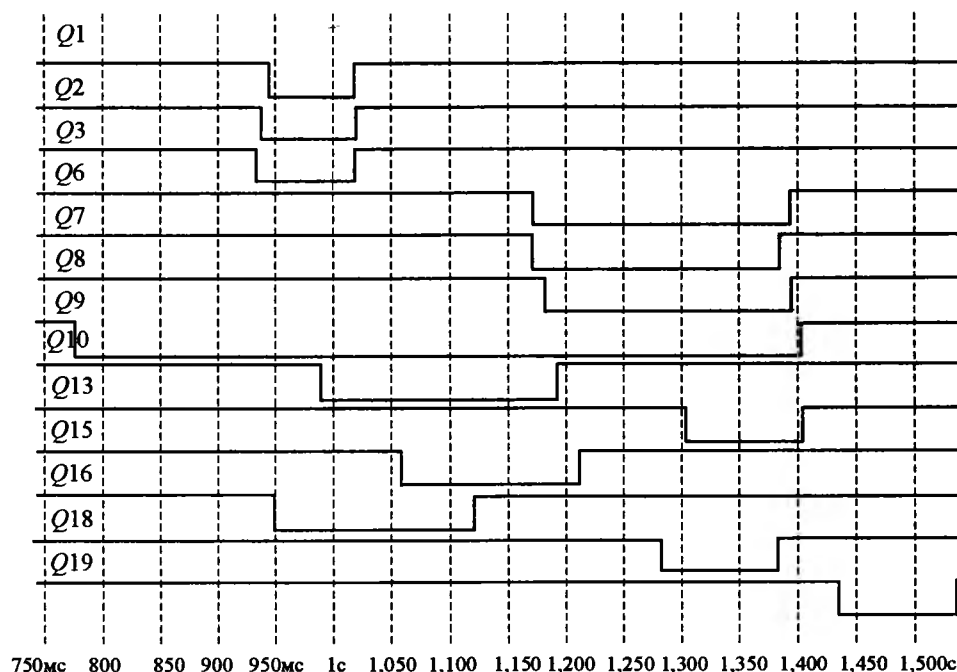


Рис.2. Последовательность команд при испытаниях вакуумного выключателя в режиме "включение-отключение"

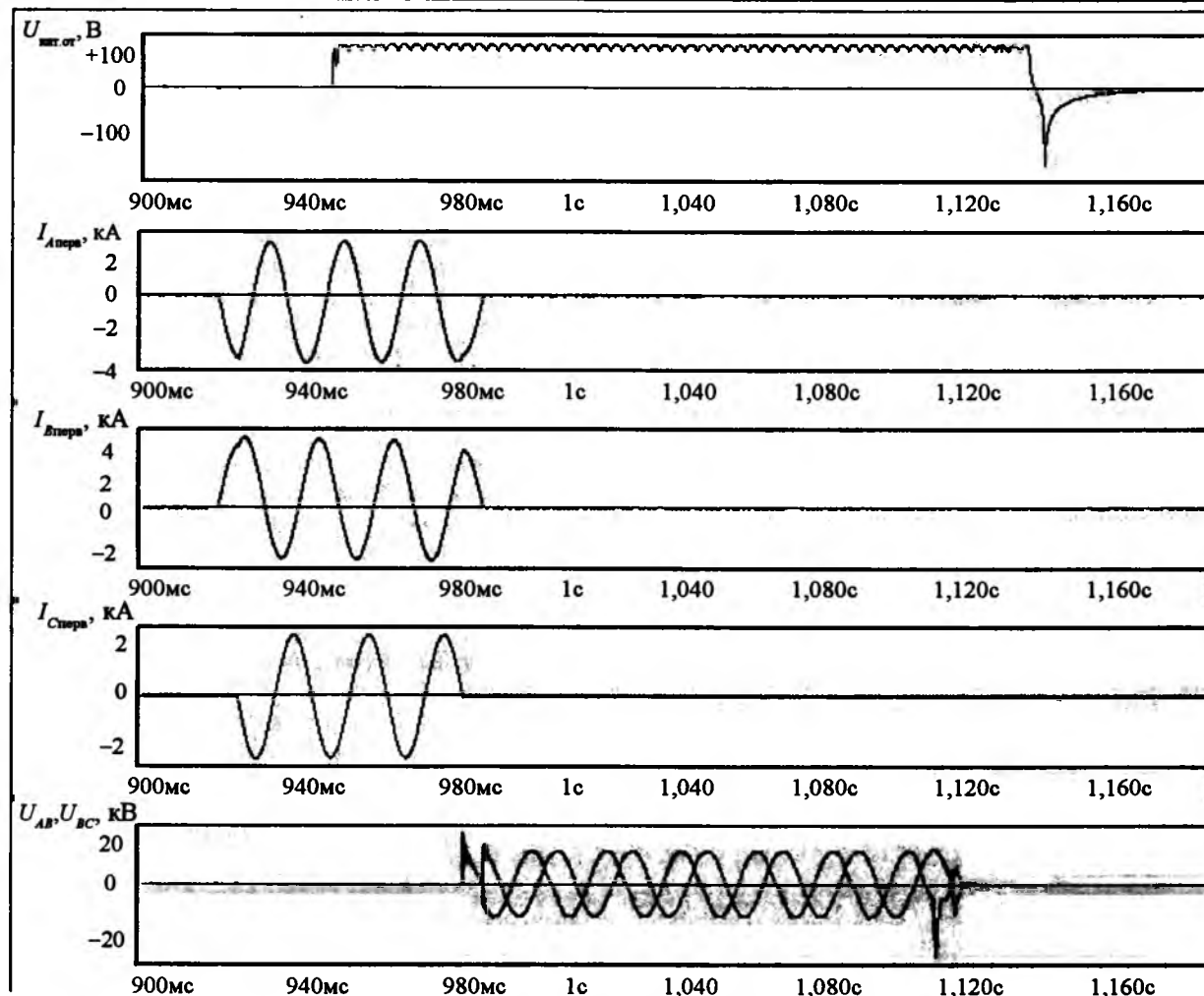


Рис.3. Осциллограммы аналоговых сигналов при испытании вакуумного выключателя в режиме "отключение"

экране ИС либо об успешности опыта, либо о причинах досрочного завершения.

Если в процессе опыта был зафиксирован сбой в работе силового ключа, об этом сообщается оператору с указанием номера канала.

К концу опыта в памяти МПУ формируется файл регистрограмм с информацией о поведении в процессе опыта каналов управления и файл осциллограмм с информацией о поведении первичной схемы и испытуемого объекта. Пользователь переносит файл осциллограмм из МПУ на ПЭВМ для дальнейшего их отображения и обработки специальными средствами.

На рис.2 и 3 приведены осциллограммы МПУ [6], записанные при испытаниях вакуумных выключателей на коммутационную способность. Рис.2 иллюстрирует работу системы при испытаниях вакуумного выключателя на коммутационную способность в режиме "включение-отключение". В окне размещены регистрограммы импульсов управления выбранных каналов.

Для проведения опыта использовались 13 каналов управления системы. Каналы 1,2,3 – включение фазы А,В,С включающего аппарата ударного генератора. Каналы 6,7,8 – отключение фазы А,В,С защитного выключателя ударного генератора. Канал 9 – запуск внешнего осциллографа 1. Канал 10 – запуск внешнего осциллографа 2. Канал 13 – команда на включение автомата гашения поля ротора ударного генератора. Канал 15 – команда на катушку отключения испытуемого выключателя. Канал 16 – команда на катушку включения испытуемого выключателя. Канал 18 – команда на дублирующий защитный выключатель ударного генератора. Канал 19 – команда завершения опыта.

Рис.3 содержит записанные МПУ осциллограммы аналоговых сигналов испытуемого вакуумного выключателя на коммутационную способность в режиме "отключение". Там же показаны фазные токи и линейные напряжения выключателя, а также напряжение на катушке отключения.

Микропроцессорное управляющее устройство – это покупной прибор заводского исполнения с габаритами 300×275×320.

ПСК включает в себя несколько кассет ЕВРО-МЕХАНИКА (440×275×250), число которых определяется количеством каналов управления (модулей УСК). На задней стороне каждой кассеты расположены клеммники WAGO, с помощью которых осуществляется подключение сигнальных, силовых и питающих кабелей. С одной стороны панель подключается кабелями к микропроцессорному устройству, с другой – к распределительному клеммнику исполнительных устройств. Связь между МПУ и ИС осуществляется через адаптеры с гальванической развязкой 3 кВ.

Результаты разработки и внедрения прибора автоматического управления опытами показали, что современная микропроцессорная система обеспечивает высокую точность задания временных интервалов, удобство работы, повышение качества испытаний, запись токов и напряжений испытательной схемы. За 6 мес эксплуа-

тации прибора не отмечено ни одного отказа в срабатывании каналов управления.

#### Список литературы

1. Каттель Л.Г., Ляшенко В.Д., Мещеряков Б.М. и др. Новая установка для испытаний высоковольтных аппаратов на коммутационную способность // Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. М.: Информэлектро. 1971. Вып. 9.
2. Чернышев Н.М., Арзьев А.М. Прибор для автоматического управления опытами в лаборатории разрывных мощностей // Электричество. 1959. № 3. С. 50–55.
3. А.с. 108330 СССР. Способ автоматического управления опытом при испытаниях выключателей на отключающую способность / Чернышев Н.М.
4. Чернышев Н.М., Ляшенко В.Д. Синхронизирующее устройство синтетической схемы испытания выключателей на отключающую способность // Электричество. 1960. № 2.
5. Носик Л., Собакарь Т., Кондрычин Э. Аварийный регистратор БАРС: характеристики и опыт эксплуатации // СТА современные технологии автоматизации. 2001. №3.
6. Носик Л.П., Собакарь Т.В. Аварийные осциллографы в составе АСУ ТП – требование времени. Регистратор БАРС на энергообъектах // Материалы выставки-семинара ФСК РАО ЕЭС "Электрические сети России". 2004.

## Микропроцессорный автоматический регулятор типа AVR-2М для систем возбуждения завода "Электросила"

ЛОГИНОВ А.Г., ФАДЕЕВ А.В.

*На базе регулятора АРВ-М, нашедшего широкое применение на отечественных и зарубежных электростанциях, создан регулятор нового поколения AVR-2М. Проанализирован опыт эксплуатации регулятора АРВ-М. Рассмотрены функции регулирования, управления и связи с оператором нового регулятора. Представлены данные по его конструктивному исполнению.*

За истекшее пятилетие на заводе "Электросила", филиале концерна "Силовые машины", освоено производство систем возбуждения нового поколения. Их создание было вызвано стремлением существенно повысить конкурентоспособность концерна как производителя энергетического оборудования с учётом международных норм и стандартов. В настоящее время эти системы оснащаются микропроцессорным регулятором возбуждения второго поколения типа AVR-2М, разработанного с учётом современных требований к системам возбуждения на основе опыта разработки, испытаний и эксплуатации регулятора АРВ-М.

Регулятор первого поколения АРВ-М [1], предназначенный для серийного производства, был

*On the basis of the regulator ARV-M, which has found wide application in domestic and foreign power stations, the regulator of new generation AVR-2M is created. Operating experience of the regulator ARV-M is analyzed. Functions of regulation, control and communication with the operator for the new regulator AVR-2M are considered. Data on its design are presented.*

разработан в 2000 г. К настоящему времени заводом "Электросила" произведено более 130 систем возбуждения, оснащённых этим регулятором, в том числе более 50 систем для стран дальнего зарубежья.

Ранее предпринимались попытки создания микропроцессорных регуляторов возбуждения. Так, в середине 80-х годов завод "Электропульт" поставил регуляторы АРВ-СДМ на Заинскую ГРЭС и Нурекскую ГЭС, а в 1992 г. на Бурштынской ГРЭС был введён в эксплуатацию регулятор возбуждения асинхронизированного турбогенератора. Однако из-за несовершенства аппаратных средств того времени, их недостаточной надёжности, неготовности персонала электростанций к эксплуатации цифровых систем эти раз-

работки не получили дальнейшего применения. Тем не менее, положительным результатом этих работ явилось накопление опыта создания цифровых систем – были разработаны цифровые датчики режимных параметров генератора и системы возбуждения, методы резервирования, диагностики, организации вычислительного процесса.

В результате более чем пяти лет промышленной эксплуатации микропроцессорных регуляторов возбуждения АРВ-М стали очевидными их сильные стороны, а также выявились некоторые показатели, требующие улучшения.

К безусловным преимуществам регулятора нужно отнести следующие:

1. Основным отличием АРВ-М от регуляторов возбуждения предыдущих поколений является расширенный набор выполняемых функций. Помимо традиционного назначения (регулирование напряжения шин станции, повышение пределов устойчивости, улучшение демпфирования послеаварийных качаний, ограничение режимных параметров генератора и системы возбуждения) АРВ-М осуществляет фазоимпульсное управление тиристорным выпрямителем, управляет коммутационными аппаратами возбудителя, выполняет ряд защит тиристорного выпрямителя. Регулятор используется как в тиристорных, так и бесщёточных системах возбуждения, в одноканальной (резервирование регуляторов) и двухканальной (резервирование регуляторов и тиристорных выпрямителей) системах. Регулятор реализует широкий набор технологических функций, в том числе управление возбуждением при пуске газотурбинного энергоблока, при зарядке линии, при электрическом торможении гидрогенератора, при переходе с резервного на основной возбудитель и т.д. Программное обеспечение может быть настроено на выполнение функций регулятора главного генератора, вспомогательного генератора, резервного тиристорного возбудителя. При этом аппаратные средства практически остаются неизменными.

2. Основные технические параметры АРВ-М, такие как быстродействие и точность, и сегодня соответствуют уровню лучших мировых образцов.

3. Отсутствие дрейфа параметров регулятора исключает необходимость его периодической ревизии.

4. За счёт развитой самодиагностики упрощены процедуры поиска неисправностей регулятора и системы возбуждения.

5. Радикально упрощены процедуры задания настроечных параметров по сравнению с аналоговыми регуляторами. В АРВ-М отсутствуют переменные резисторы – основной источник отказов аппаратуры.

6. Имеется возможность оперативной, в том числе, дистанционной адаптации алгоритмов АРВ-М к потребностям конкретной электростанции. Это означает, что изменение программы регулятора может быть выполнено на заводе, после чего загрузочный файл пересылается по электронной почте, и далее его загрузка осуществляется силами наладочного персонала завода либо силами персонала электростанции.

7. В результате резкого сокращения аппаратных средств, наличия многочисленных сервисных функций, принципиально невозможных в аналоговой технике, существенно сокращены сроки ввода систем возбуждения в эксплуатацию. Упрощено техническое обслуживание самого регулятора и других компонентов систем возбуждения.

8. АРВ-М позволяет легко интегрировать системы возбуждения в АСУ электростанций.

В результате испытаний на электродинамических моделях МЭИ и НИИПТ [2], сопровождения программного обеспечения в процессе промышленной эксплуатации регулятора АРВ-М были отработаны алгоритмы регулирования, управления, защиты, контроля и диагностики, которые были перенесены в регулятор AVR-2М. Улучшений, как показала практика, требовала главным образом конструкция регулятора (рис. 1).

Конструкция АРВ-М была обусловлена особенностями конструкции его главного элемента – ячейки контроллера. Разработанная в 1998 г. эта ячейка воплотила в себе высшие схемотехнические и технологические достижения того времени. Желание получить доступ ко всем возможностям микроконтроллера C167, на базе которого построена ячейка, привело к тому, что на ней кроме основного разъёма системной шины AT-96, установленного на задней стороне, имеется несколько дополнительных разъёмных соединений с плоским кабелем, расположенных на компонентной стороне платы. Очевидно, что наличие в кассете регулятора соединений плоским кабелем усложняет процесс замены ячеек, сни-

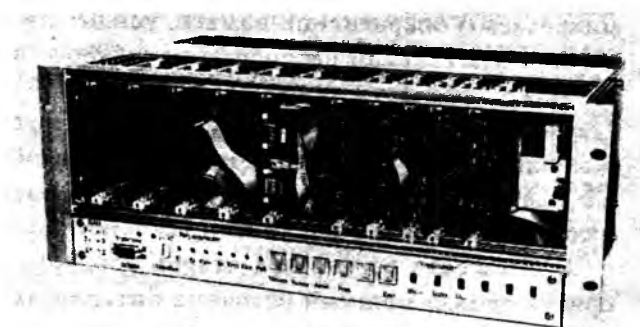


Рис. 1. Регулятор типа АРВ-М



Рис.2. Регулятор типа AVR-2M

жает его помехозащищенность. Так, при испытаниях регулятора на устойчивость к электромагнитным воздействиям наблюдались программные сбои с последующим восстановлением функций при степени жесткости 2–3 [3]. При этом система контроля безударно переводила управление системой возбуждения на резервный регулятор. Кроме того, при температуре среды выше 45°C в некоторых случаях наблюдались сбои источника питания и, как следствие, переход на резервный регулятор.

Эти недостатки были учтены при разработке второго поколения микропроцессорного регулятора возбуждения AVR-2M (рис 2.). Основными целями разработки были радикальное улучшение электромагнитной совместимости и увеличение максимально допустимой температуры окружающего воздуха. Для их достижения были выполнены следующие мероприятия:

1. Для кассеты регулятора применён конструктив фирмы "Rittal" с повышенной степенью электромагнитной защиты.

2. В кассете регулятора полностью исключены объёмные проводники, оптимизирована архитектура регулятора. Раньше использовались явно выраженная ячейка контроллера и ячейки устройств связи с объектом, соединенные между собой пассивной кросс-платой и ленточными кабелями. В регуляторе AVR-2M микроконтроллер, микросхемы оперативной памяти, усилители системной магистрали расположены на кросс-плате. В эту же плату запрессованы специальные "двухсторонние" разъёмные соединения, в которые с лицевой стороны устанавливаются ячейки, а с тыльной стороны – разъёмы кабелей, соединяющие регулятор с внешними устройствами.

3. В кассете регулятора старой конструкции присутствовал мощный источник питания, который преобразовывал входное напряжение в диапазоне 100–370 В DC/AC в группу вторичных напряжений (+24, +15, -15, +5В). Повышенное тепловыделение в этом источнике приводило к

местным перегревам электронных компонентов регулятора. Для устранения указанного недостатка в регуляторе новой конструкции использованы DC/DC – конверторы малой мощности с входным напряжением 24 В. При этом источник питания, преобразующий входное напряжение широкого диапазона в стабилизированное напряжение 24 В устанавливается вне кассеты регулятора.

4. В регуляторах APB-M измерительные датчики токов и напряжений фирмы LEM размещаются на плате, установленной на задней стороне кассеты регулятора, цепи от трансформаторов тока и напряжения подключаются к клеммам, установленным на этой плате. В регуляторе AVR-2M, с целью упрощения монтажа и снижения уровня электромагнитных помех, эти датчики перенесены в отдельные малогабаритные блоки, монтируемые на DIN-рейке шкафа.

Меры по улучшению конструкции кассеты регулятора привели к желаемому результату: работоспособность регулятора обеспечивается при температуре окружающего воздуха выше 55°C, регулятор выдерживает без сбоев в работе электромагнитные и электростатические воздействия степени жесткости 4.

Кроме перечисленных конструктивных особенностей регулятора AVR-2M следует отметить его другие отличия от APB-M, вызванные не столько необходимостью "устранить слабые места", сколько появившимися за последние годы новыми возможностями.

Семейство микроконтроллеров C167, на базе которого выполнен APB-M, расширилось и дополнилось новыми образцами с лучшими характеристиками. В регуляторе AVR-2M применен более производительный микроконтроллер ST10F269 с тактовой частотой 40 МГц, вдвое превышающей тактовую частоту микроконтроллера C167 и арифметическим сопроцессором. Размещённой на кристалле flash-памяти объёмом 256 кбайт и оперативной памяти объёмом 12 кбайт вполне достаточно для хранения программ, промежуточных результатов расчёта, вариантов настроек и данных конфигурации регулятора (ранее для этого использовались дополнительные микросхемы). Внешнее ОЗУ объёмом 1 Мбайт используется в AVR-2M только для аварийного осциллографирования. Использование памяти на кристалле позволило дополнительно повысить надежность регулятора и, за счёт исключения тактов ожидания, увеличить производительность процессора.

Применение микроконтроллера ST10F269 позволило создать регулятор AVR-2M-500 с расширенным до 600 Гц диапазоном работы системы

импульсно-фазового управления, что требуется для управления бесщёточным возбудителем, получающим питание от подвозбудителя с постоянными магнитами.

В состав программного обеспечения AVR-2M включены тестовые программы, облегчающие проведение испытаний системы возбуждения на заводе-изготовителе и поддерживающие наладочные работы на электростанции. При создании комплекса тестовых программ ставилась задача сокращения объёма работ, выполняемых на вращающемся генераторе.

Тестовые программы обеспечивают:

1. Тестирование подсистемы ввода/вывода дискретных сигналов, позволяющее на остановленном генераторе проверить цепи управления и сигнализации регулятора.

2. Тестирование тиристорного выпрямителя. На остановленном генераторе при снятом питании тиристорного выпрямителя имеется возможность проверки прохождения импульсов управления тиристорами. При питании, поданном от собственных нужд станции, проверяется управляемость тиристорного выпрямителя.

3. Тестирование системы возбуждения в режиме регулирования тока возбуждения, так называемый режим заводских испытаний. В этом режиме питание тиристорного выпрямителя производится по схеме независимого возбуждения. По команде "Возбуждение" уставка по току возбуждения устанавливается равной нулю, после чего обеспечивается регулирование тока возбуждения в широком диапазоне. Этот режим используется при снятии характеристик КЗ и ХХ генератора.

В процессе эксплуатации данные о состоянии и значения режимных параметров генератора и системы возбуждения выводятся на сенсорный дисплей, размещённый в том же шкафу, что и регуляторы. Этот дисплей может использоваться для изменения настроек регулятора, отображения состояния входных и выходных дискретных сигналов.

Для связи с оператором при наладке системы возбуждения разработана программа Avr2mView, выполняемая на персональном компьютере и имеющая вид привычного Windows-приложения. По сравнению с сенсорным дисплеем эта программа предоставляет более широкие возможности, форма представления данных более удобна для оператора. Программа Avr2mView обеспечивает:

1. Создание конфигурации программного обеспечения регулятора в соответствии с требованиями конкретного проекта. Выбором опций, предлагаемых Avr2mView, программное обеспечение регулятора настраивается в зависимости от типа генератора, системы возбуждения, необходимости выполнения тех или иных технологических функций. Имеется возможность оперативного переназначения дискретных входов и выходов. Эта работа может выполняться без подключения персонального компьютера к регулятору. Созданный файл конфигурации затем записывается во flash-память регулятора.

2. Предварительная настройка регулятора. Эта работа также может выполняться без подключения персонального компьютера к регулятору.

3. Изменение настроек с возможностью их запоминания во flash-памяти регулятора, где может храниться более 50 версий настроек.

4. Отображение состояния и параметров генератора и системы возбуждения в реальном времени.

5. Отображение в графической форме и в реальном времени значений режимных параметров генератора и системы возбуждения (цифровой осциллограф).

6. Отображение изменения состояния входных и выходных дискретных сигналов, диагностических сообщений (дневник событий с разрешением 10 мс).

7. Отображение аналоговых параметров в табличной и графической формах во время аварийных процессов (регистратор аварийных событий).

Впервые регулятор нового поколения прошел испытания на главном и вспомогательном генераторах укрупненного блока Усть-Илимской ГЭС, пуск которого состоялся в октябре 2005 г. К настоящему времени заводом "Электросила" изготовлено более 10 систем возбуждения, оснащенных регуляторами AVR-2M.

#### Список литературы

1. Логинов А.Г., Фадеев А.В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО "Электросила" // Электротехника. 2001. №9.

2. Научно-технические рекомендации по использованию АРВ-М. С.-Пб.: ОАО "НИИ по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения". РАО "ЕЭС России", 2002.

3. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. М., 2001.

# Контроль повышенний напряжения в системах мониторинга трансформаторного оборудования

ВАЛУЙСКИХ А.О., КРАЯЧИЧ А.В., ЦФАСМАН Г.М.

Описан разработанный в ГУП ВЭИ специально для систем мониторинга микропроцессорный датчик токов, напряжений и мощностей типа ДТНМ, в который заложены алгоритмы контроля напряжений, соответствующие ГОСТ 1516.3-96.

В "Общих требованиях к системам мониторинга, управления и диагностики трансформаторов (автотрансформаторов) и шунтирующих реакторов (СМУИД)", утвержденных ФСК ЕЭС, оговаривается необходимость анализа и регистрации повышенний напряжений на обмотках трансформаторов и реакторов в соответствии с требованиями ГОСТ 1516.3-96. Для удовлетворения этих требований необходимо фиксировать превышения амплитудой напряжения целого ряда (до 10) пороговых уровней при длительностях повышения напряжения от 0,1 с до нескольких часов, причём для исключения ложной фиксации перенапряжений при наличии помех во входных сигналах датчиков требуется введение некоторых алгоритмов фильтрации измеренных значений.

Применяемые во многих системах мониторинга стандартные приборы контроля мощности и качества электроэнергии не обеспечивают требуемой гибкости построения алгоритмов контроля напряжения. К тому же эти приборы, предназначенные для коммерческого учёта электроэнергии, очень дороги. Учитывая, что относительно высокая стоимость систем мониторинга является одним из заметных факторов, сдерживающих оснащение такими системами парка трансформаторного оборудования в России, целесообразно применять специализированные устройства контроля напряжения.

## Датчик типа ДТНМ

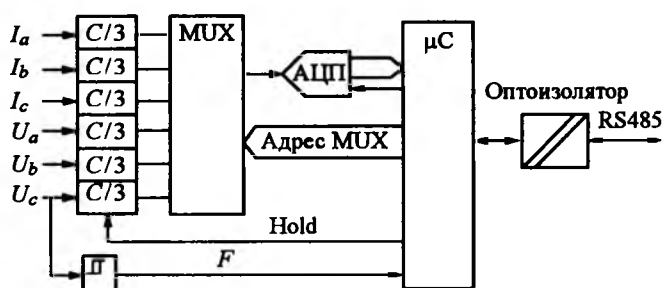
В системах управления и мониторинга трансформаторного оборудования (СУМТО) разработки ГУП ВЭИ используется собственный микропроцессорный датчик токов, напряжений и мощностей типа ДТНМ со специализированным программным обеспечением, позволяющим реализовать алгоритмы контроля длительных повышенний напряжения, полностью соответствующие ГОСТ 1516.3-96.

The microprocessor sensor of currents, voltage and power for monitoring systems of type DTNM in which algorithms of the control of voltage are incorporated, corresponding State Standard GOST 1516.3-96 is developed in The State Unitary Enterprise "All-Russian Electrotechnical Institute named after V. Lenin" (GUP VEI) for using in the systems of monitoring.

Аппаратно датчик выполнен по обычной для подобных устройств схеме (рисунок) – мгновенные значения сигналов, пропорциональных токам и напряжениям контролируемого трёхфазного присоединения, одновременно фиксируются в равноотстоящие моменты времени ячейками слежения/запоминания (С/З), затем через мультиплексор подаются на аналогово-цифровой преобразователь и оцифровываются. Дальнейшая обработка информации осуществляется высокопроизводительным микроконтроллером с функциями цифрового сигнального процессора.

Нормализация входных сигналов, поступающих от трансформаторов тока и напряжения, осуществляется с помощью промежуточных трансформаторов, выполненных с использованием высококачественных магнитопроводов из нанокристаллического магнитного материала ГМ501.

Один из входных сигналов напряжения поступает на компаратор, на выходе которого формируется импульсный сигнал с частотой, равной частоте сети. Этот сигнал используется микроконтроллером для измерения частоты в сети и для точного задания интервалов оцифровки входных сигналов. Для удобства реализации алгоритмов гармонического анализа сигналов в ДТНМ принято количество точек съёма информации на периоде сетевого напряжения, равное степени 2. В зависимости от сложности алгоритмов обра-



Функциональная схема ДТНМ



ботки при конфигурировании могут задаваться 16, 32 или 64 точки на период.

В каждой точке на протяжении периода осуществляется запоминание данных для последующего гармонического анализа, накопление сумм квадратов токов и напряжений и сумм мгновенных значений мощностей по всем фазам. Для однофазных трансформаторов и реакторов в соответствии с требованиями ГОСТ 1516.3-96 фиксируются только фазные напряжения, для трёхфазных – также и линейные. Кроме этого, контролируются абсолютные значения напряжений для выявления их амплитуд на каждом полупериоде.

Для повышения точности измерений в программное обеспечение датчика ДТНМ включена возможность начальной полуавтоматической калибровки аналоговых каналов измерения. Калибровка осуществляется либо по эталонным сигналам, либо совместно с реальными ТТ и ТН подстанции – сравнением с информацией, получаемой от прецизионных средств измерения АСКУЭ. Калибровка проводится как по амплитуде сигналов, так и по сдвигу фаз между токами и напряжениями, чтобы обеспечить точность измерения активной и реактивной мощности. Полученные по результатам калибровки настроечные параметры записываются в постоянную память датчика.

В паузах между измерениями микроконтроллер в фоновом режиме осуществляет обработку информации, накопленной на предыдущем периоде: расчёт действующих значений токов и напряжений, активной, полной и реактивной мощности и cosφ, определение крест-фактора. Если требуется по заданию, осуществляется Фурье-анализ кривых тока и напряжения.

Здесь же выполняется и алгоритм контроля повышений напряжения.

### ГОСТ 1516.3-96 и алгоритмы контроля повышений напряжения

При реализации алгоритма контроля повышений напряжений на соответствие требованиям ГОСТ 1516.3-96 возникает ряд вопросов, связанных с тем, что формулировки ГОСТ не ориентированы на автоматизированные системы контроля. Главный из них – что считать перерывом между повышениями напряжения соответствующего уровня. Например, если между двумя интервалами повышенного до уровня 1,05 напряжения длительностью по 25 мин был интервал в несколько периодов с нормальным напряжением: считать ли эту ситуацию как два повышения длительностью по 25 мин (формально по ГОСТ) или как одно повышение длительностью 50 мин (в соответствии со здравым смыслом)?

В первом случае нарушается требование ГОСТ (п.Б7), чтобы интервал между двумя такими повышениями был не менее 12 ч, и это нарушение должно быть в обязательном порядке зарегистрировано записью в журнал предупреждений и тревог. Кроме того, после таких двух повышений напряжение не должно повышаться в течение минимум 24 ч в нормальной ситуации и 4 ч в аварийной, о чём система мониторинга должна предупредить оператора.

Во втором случае имеет место однократное вполне допустимое повышение напряжения (его длительность допускается до 3 ч), и его следует только зарегистрировать, не отвлекая внимания оператора.

Далее, в стандарте оговорены дискретные значения допустимых уровней повышенного напряжения и соответствующие им дискретные значения допустимой длительности. При реальных промежуточных значениях напряжения возникают неясности. Например, при напряжении с уровнем от 1,075 до 1,100 относительно максимально допустимого рабочего напряжения для трансформаторов класса 500 кВ оговорено допустимое время 20 мин. Должен ли оператор немедленно отключить трансформатор, если уже истекли 20 мин, в течение которых длится повышенное до уровня 1,076 напряжение? По букве ГОСТ должен, ибо при времени более 20 мин допустимый уровень повышения должен приниматься, как для длительности 1 ч, т.е. 1,075. Но с точки зрения здравого смысла – можно не торопиться с отключением, так как при уровне 1,075 разрешалось бы работать ещё 40 мин, а разница между 1,076 и 1,075 (0,1%) лежит за пределами точности измерений. Какой совет должна дать оператору система мониторинга?

Ещё более запутанной выглядит реальная ситуация с нестационарным напряжением, уровень которого непрерывно меняется в некоторых пределах с неизвестным априорно распределением во времени.

Очевидно, что при решении непростой задачи формулирования жёстких требований стандарта его разработчики неявно подразумевали, что при контроле режимов оборудования оперативный персонал интуитивно осуществляет некую фильтрацию показаний приборов, а также использует свой инженерный опыт и понимание существа физических процессов в трансформаторе при повышенных напряжениях и степени их опасности. Формализация подобного рода интеллектуальной деятельности является наиболее сложным вопросом при построении автоматизированных систем контроля и управления.

Авторы считают, что при широком внедрении систем непрерывного контроля и мониторинга высоковольтного оборудования для правильной формулировки алгоритмов контроля напряжения и исключения неоднозначности их оценок ГОСТ 1516.3-96 нуждается в существенной доработке. Нам представляется целесообразным (возможно, специально для автоматизированных систем контроля) введение неких непрерывных интегральных зависимостей между уровнем повышенного напряжения и допустимым временем его существования, для которых задавались бы одна-две опорных точки в зависимости от класса изоляции и вида оборудования.

### Контроль повышений напряжения в СУМТО ГУП ВЭИ

Контроль осуществляется с использованием амплитудных значений фазных и, если нужно, линейных напряжений, выявленных на каждом периоде частоты сети, приведённых к относительным единицам делением на амплитуду максимально допустимого рабочего напряжения. Для исключения рассмотренных выше коллизий при нестационарных напряжениях используется алгоритм нелинейной фильтрации относительных амплитуд напряжений: степень фильтрации тем больше, чем меньше уровень напряжения отличается от единицы.

Отфильтрованные таким образом напряжения сравниваются поочередно со всеми уровнями, для которых в таблицах Б.1 или Б.2 ГОСТ 1516.3-96 оговорены допустимые времена. Если какой-то уровень превышен, запускается отсчёт времени длительности превышения этого уровня. Таким образом, при повышенном напряжении одновременно подсчитывается время по всем фиксированным уровням, которые превышены. Накопленное по каждому уровню время сравнивается с допустимым для этого уровня значением. При достижении предельного времени выдается предупредительная информация оператору.

Когда напряжение вновь становится ниже ранее превышенного уровня, отсчёт соответствующего

этого уровню времени заканчивается, время фиксируется, наращиваются суточные, годовые и суммарные счётчики превышений данного уровня и суммарного времени таких превышений. Полученные результаты сравниваются с допустимыми, и при превышении также формируются предупредительные сообщения оператору.

СУМТО выполнена как многоуровневая иерархическая система, на верхнем уровне которой располагается компьютер автоматизированного рабочего места (АРМ) обслуживающего персонала. С целью упрощения и удешевления датчиков нижнего и среднего уровней долговременное хранение информации организовано на резервированных жёстких дисках этого компьютера. Там же формируются все предупредительные сигналы и реализуется отображение информации оператору (кроме того, основная информация передается в АСУТП подстанции для отображения и архивирования её средствами АСУТП).

Поскольку сеансы связи между АРМ и аппаратурой среднего уровня могут осуществляться с интервалами до нескольких секунд, во избежание потери информации о кратковременных повышениях напряжения алгоритм контроля повышений напряжений разбит на два сегмента. Непосредственно в ДТНМ ведётся контроль значительных перенапряжений с допустимыми временами от 0,1 до 20 с, и по соответствующим уровням в АРМ передается уже обработанная информация. Более низкие уровни повышения напряжения, с допустимыми временами от 20 с до 8 ч, контролируются непосредственно в АРМ. Из ДТНМ для этого передаются отфильтрованные значения уровней напряжения.

В СУМТО предусмотрено интерактивное конфигурирование параметров алгоритмов контроля напряжений, токов и мощностей для конкретного оборудования: по типу (трансформатор или реактор), номинальному напряжению, коэффициентам трансформации ТТ.

СУМТО позволяет одновременно контролировать всё трансформаторное оборудование подстанции (до десятков единиц).

## Перспективная преобразовательная техника

ЧВАНОВ В.А.

Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина с момента его образования в 1921 г. взял на себя задачи решения приоритетных направлений развития электротехники в СССР. Преобразовательная техника являлась одной из главных задач, которые решались несколькими коллективами института. Из них два направления выделялись: высоковольтная техника – передачи высокого напряжения постоянного тока и преобразовательная техника общепромышленного и специального назначения. В обоих направлениях были достигнуты результаты высокого мирового уровня. Были разработаны и освоены в производстве электрооборудование высоковольтных электропередач, в том числе для линии передачи постоянного тока напряжением 1500 кВ "Экибастуз–Центр" и для Выборгской вставки постоянного тока 400 кВ, преобразователи статических компенсаторов для ЛЭП, регуляторы возбуждения генераторов, агрегаты бесперебойного питания для атомных электростанций и крупных предприятий, преобразователи привода высокооборотных центрифуг комбинатов по обогащению урана, преобразователи для железнодорожного транспорта и др.

В последнее десятилетие новый шаг в своём развитии совершила полупроводниковая техника в направлении освоения особо быстродействующих полупроводниковых приборов, что толкнуло разработчиков преобразовательной техники и другого электротехнического оборудования к созданию высокочастотных преобразователей, на основе которых наиболее экономически выгодно решаются практически все задачи, стоящие перед преобразовательной техникой. Настоящая статья посвящена одному из перспективных направлений развития преобразователей широкого назначения.

### Режимы работы энергетических установок

1. **Оптимальный режим.** Оптимальным режимом работы энергетических установок считается непрерывный, гладкий режим [1–6]. Под оптимальностью понимается совокупность результирующих факторов: минимума потерь, минимума массы, габаритов, стоимости установки, максимума надёжности и т.д. Большинство мощных установок строится на основе именно этой сово-

купности технических требований [1–9]. Наиболее типичным примером могут служить режимы работы гидроузлов, тепловых и ядерных паровых реакторов электростанций. Основные источники электроэнергии, какими являются электростанции, работают в условиях, когда мощность самого источника энергии значительно превосходит мощности многочисленных отдельных потребителей. В усреднённом виде энергия, производимая электростанциями, равна энергии всех потребителей. Но в каждый момент времени потребляемая энергия постоянно изменяется – флуктуирует. Регулирующие органы электростанций следят за изменением потребляемой энергии и с течением времени восстанавливают равновесие энергий – потребляемой и производимой. Мгновенные, текущие значения разницы энергий потребителей и производителей сглаживаются инерционными элементами энергосистемы, которые имеются как в составе производителей, так и среди потребителей.

2. **Автономная система.** Автономные системы энергоснабжения находятся совершенно в иных условиях. Изменение потребляемой энергии происходит резко, особенно если источник энергии имеет одного потребителя. В этом случае характерным является резкий полный наброс или сброс энергии потребления. Источник энергии и потребитель имеют одинаковую или соизмеримую мощность. Удержание устойчивого режима работы автономного источника энергии в таких условиях является главной задачей обеспечения работоспособности энергоустановки в целом.

Полупроводниковые преобразователи электроэнергии – типичный представитель источника энергии, работающий в режиме автономной системы (соизмеримая мощность преобразователя и нагрузки). Преобразователь должен обеспечить качество электроэнергии в длительных режимах, обладать устойчивостью работы в динамических режимах – при набросах и сбросах нагрузки, а также в аварийных и аномальных режимах. К таким режимам относятся: КЗ в цепях нагрузки, режимы перегрузки, режимы ХХ.

Глобальным решением проблемы автономных систем является такое построение схемы, при которой обеспечивается способность преобразо-

вателя работать в выбранном заранее, экономичном, управляемом системой регулирования режиме. Схема преобразователя должна обладать следующими свойствами:

- выдавать заданные (нормальные) параметры энергии на выходе в нормальных рабочих режимах – при изменении нагрузки от минимальной до максимальной;
- работать в режиме ХХ с заданным уровнем напряжения и частоты на выходе;
- работать в режиме КЗ в цепи нагрузки с уровнем тока КЗ, задаваемым системой управления преобразователя;
- работать в режимах аномальной перегрузки, при этом допускаются отклонения параметров электроэнергии от нормальных, но в рамках безопасности по напряжению, току, частоте.

Практически ни один из известных способов преобразования (преобразование тока [1], напряжения [1], резонансный [2]) всей совокупности перечисленных требований не удовлетворяет.

В последнее десятилетие особое внимание уделяется новому – квантовому способу преобразования электроэнергии [3–6]. Этот способ преобразования позволяет оптимальным образом решить проблемы автономных источников питания. Вопросу построения преобразователей на основе квантового способа преобразования посвящена настоящая статья.

### Схема квантового преобразователя

**1. Структура квантового преобразователя.** На рис.1 представлена схема квантового преобразователя (КП), где ПИЭ – первичный источник электроэнергии: сеть переменного тока, выпрямитель, фильтр, на выходе ПИЭ должно быть напряжение постоянного тока;  $\Phi$  – фильтр для сглаживания пульсаций от тока колебательного контура и, в случае необходимости, силовой делитель постоянного напряжения с средней точкой; КК – колебательный контур с полупроводниковым ключом; ПНЧ – преобразователь пониженной частоты, отбирает от колебательного контура кванты энергии и преобразует их в энергию необходимого для нагрузки качества: сглаженный постоянный ток, однофазный или многофазный переменный ток с заданными напряжением, частотой, количеством фаз и допустимым уровнем искажений, параметры электроэнергии на выходе квантового преобразователя – регулируемые и/или стабилизируемые;  $H$  – нагрузка.

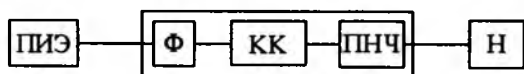


Рис.1. Структура квантового преобразователя

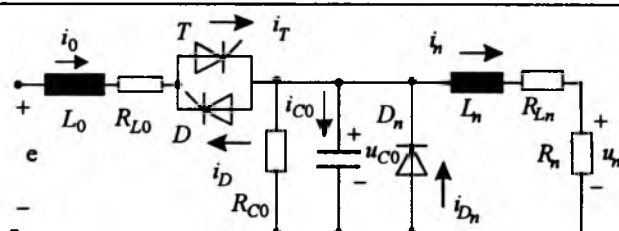


Рис.2. Простейшая схема квантового преобразователя:

$e = 1100$  В;  $L_0 = 20$  мкГн;  $R_{L0} = 0,000889$  Ом;  $C_0 = 18,238$  мкФ;  $R_{C0} = 1613,33$  Ом;  $L_n = 2$  мГн;  $R_{Ln} = 0,02$  Ом;  $R_{Hном} = 2$  Ом;  $u_{ном} = 1000$  В;  $i_{ном} = 500$  А;  $P_{ном} = 500$  кВт

### 2. Простейший квантовый преобразователь.

Схема и параметры простейшего квантового преобразователя представлены на рис.2. Это преобразователь постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня. В качестве одной из нескольких ячеек преобразователя схема рис.2 может использоваться в преобразователях переменного однофазного и многофазного [6] напряжения (например, для установок индукционного нагрева, для питания озонаторов, приводов насосов нефтедобычи и т.д.). Частота колебательного контура  $F_0 = 8333$  Гц, частота управления регулируется в пределах  $F_y = 0 \div 7616$  Гц. В связи с довольно большой мощностью (500 кВт) при реализации преобразователя на основе выпускающихся отечественной и зарубежной промышленностью быстродействующих тиристоров и диодов [7] можно использовать тиристоры с относительно большим временем выключения 10 мкс. Поэтому частота контура выбрана относительно низкой (8333 Гц). Но при таком уровне мощности применение полупроводниковых ключей других типов (IGBT, IGCT) привело бы к необходимости выбирать частоту контура ещё более низкой (в несколько раз) [6, 7], что повлекло бы за собой увеличение массы, габаритов, потерь в преобразователе. На более низких мощностях (от одного до десятков киловатт) частота колебательного контура может быть выбрана более высокой (до 100 кГц) [6], поскольку могут быть использованы тиристоры с временем выключения 1–2 мкс.

### Режимы работы квантового преобразователя

**1. Номинальный режим.** Вольт-секундный квант. На приводимых далее осциллограммах (рис.3–4) представлены:  $e$  – ЭДС первичного источника питания постоянного тока;  $u_{C0}$  – напряжение на конденсаторе КК;  $i_0$  – ток колебательного контура;  $i_n$  – ток нагрузки;  $V_q$  – вольт-секундный квант, генерируемый контуром,

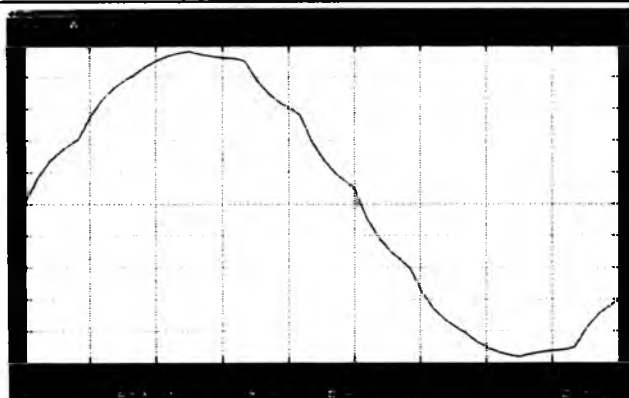


Рис.3. Осциллограмма одного периода установившегося режима работы преобразователя с параметрами по рис.2

$$V_q = \int_0^{T_y} u_{C0} dt, \quad (1)$$

где  $T_y$  – период управления, период работы КК.

На рис.3 отражён один период установившегося режима, длящийся в течение периода управления  $T_y = 131,31$  мкс. Ток нагрузки в начале ( $i_{n0}$ ) и конце ( $i_{nk}$ ) периода равен 500 А, среднее значение тока за период тоже равно 500 А. Контур на периоде (рис.3) формирует вольт-секундный квант  $V_q = 0,131$  В·с. Начало активного интервала работы преобразователя определяется моментом  $t = 0$ , когда включается импульсом управления тиристор  $T$ . На интервале  $t = 0 + t_1$  ( $t_1 = 10$  мкс) проводит ток диод  $D_n$ , в котором ток  $i_{Dn}$  спадает от  $i_{n0} = 500$  А до нуля. Ток  $i_0$  нарастает от нуля до 500 А. В момент, когда ток  $i_0$  нарастает до 500 А, диод  $D_n$  выключается, конденсатор  $C_0$  включается в цепь "источник питания – реактор колебательного контура  $L_0$ " – начинается процесс колебания энергии в контуре. До момента  $t_2 \cong \cong 80$  мкс проводит тиристор  $T$ . В момент  $t_2$  ток  $i_0$  меняет знак, тиристор выключается, а диод  $D$  включается и проводит до момента  $t_3$ :

$$T_8 = t_3 - t_2. \quad (2)$$

В интервале проводящего состояния диода интервал  $T_8$  предоставляется тиристору для восстановления непроводящего состояния.

В момент  $t_3$  диод  $D$  выключается и контур отключается от первичного источника, но напряжение на конденсаторе  $u_{C0}$  ( $t = t_3$ )  $= u_{C0k} \neq 0$ . С этого момента конденсатор разряжается до нуля через цепь нагрузки в течение интервала

$$T_p = t_4 - t_3. \quad (3)$$

Интервал  $T_p \neq 0$  из-за наличия потерь в КК и в режиме малой нагрузки и XX оказывает сильное воздействие на режим работы КП.

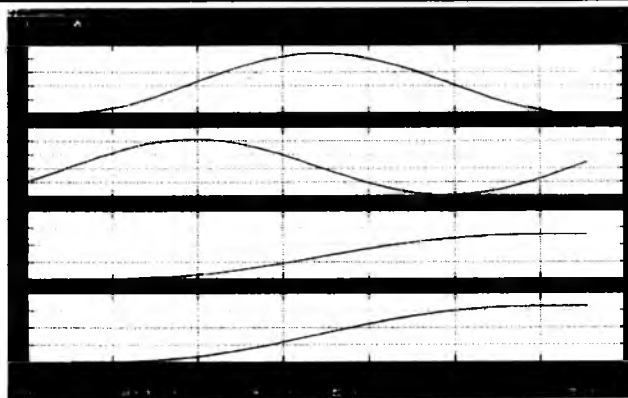


Рис.4. Осциллограмма режима КЗ при  $i_{n0} = 500$  А

С момента  $t = t_4$  начинается пауза, длительность которой полностью определяется системой управления преобразователя, которая производит повторное включение тиристора в определяемый системой регулирования момент, и колебательный процесс повторяется. В номинальном режиме и в режимах перегрузки пауза минимальная и может быть равна нулю. Согласно расчёту (рис.3) пауза при номинальной нагрузке равна  $T_n = t_5 - t_4 = 16,33$  мкс.

2. Зависимость энергии кванта от тока нагрузки. Параметры схемы рис.2 выбраны так, что нагрузка не влияет на значение  $V_q$ , формируемого преобразователем на каждом периоде  $T_y$ . Результаты расчёта на ММ зависимости значения квантов  $V_q$  от тока нагрузки  $i_n$  ( $i_{n0}$  – значение тока нагрузки  $i_n$  в начале периода) приведены в таблице.

$i_{n0}, \text{ А}$	0***	500*	500**	650**	800**	1000**
$V_q, \text{ В·с}$	0,130	0,131	0,1298	0,1296	0,1294	0,1288
* Номинальный режим $R_n = 2$ Ом						
** КЗ на выходе преобразователя $R_n = 0$						
*** Режим XX						

Номинальный режим нагрузки соответствует  $i_{n0} = 500$  А. Время, предоставляемое схемой преобразователя для выключения тиристора в этом режиме,  $T_8 = 50$  мкс. Режимы при  $i_{n0} > 500$  А соответствуют перегрузке. Расчётная перегрузка равна 60% ( $i_{n0} = 800$  А), при этом  $T_8 = 30$  мкс. Схема рис.2 рассчитана на использование тиристора, имеющего время выключения  $T_q = 10$  мкс ( $k_3 = T_8/T_q = 3$ ,  $k_3$  – коэффициент запаса). В случае тиристора с  $T_q = T_8 = 0$  был бы возможен режим с током  $i_{n0} = 1000$  А.

Из анализа результатов таблицы следует, что, действительно, схема рис.2 генерирует ВС-кван-

ты постоянного значения независимо от тока нагрузки. Из результатов таблицы следует также, что схема КП преобразователя сохраняет работоспособность при:

- ХХ ( $i_{n0} = 0$ );
- номинальной нагрузке ( $i_{n0} = 500$  А);
- перегрузке на 60% ( $i_{n0} = 800$  А);
- КЗ в цепи нагрузки (рис.4).

Во всех этих режимах важную роль играет длительность паузы.

**3. Интервал паузы.** КП отличается тем, что длительность паузы регулируется так, чтобы к моменту начала очередного активного интервала остаточное напряжение на конденсаторе упало до нуля. В номинальном режиме полный разряд конденсатора в схеме рис.2 происходит за  $T_p = 5,8$  мкс. Этот разряд происходит через цепь  $L_n R_n$ . По мере снижения нагрузки длительность паузы должна увеличиваться, наибольшая длительность паузы получается при ХХ, когда разряд конденсатора происходит только через сопротивление утечки конденсатора  $R_{C0}$  и других элементов схемы. При расчётных значениях параметров преобразователя по рис.2 для полного разряда конденсатора  $C_0$  в режиме ХХ требуется  $T_p \cong 100$  мс, т.е. необходимо понизить частоту управления до  $F_y = 10$  Гц.

Можно показать, что если паузу сделать меньше 100 мс, то очередное колебание в контуре будет начинаться при  $u_{C0k} > 0$ , что с каждым новым активным интервалом будет приводить к уменьшению амплитуды колебаний, пока не произойдет их полное затухание, т.е. работоспособность КП нарушится. Теоретически квантовый преобразователь, не имеющий потерь, на ХХ является неработоспособным. Чтобы устранить это явление, необходимо предусмотреть в схеме КП разрядную цепь, как, например, в схеме [3]. Такая разрядная цепь не требуется, когда диапазон изменения нагрузки не охватывает зону малых нагрузок и ХХ.

**4. Режим КЗ.** КП обладает способностью работать при КЗ в цепи нагрузки. Его несомненным и очень важным преимуществом является то, что ток КЗ система управления преобразователя способна регулировать и ограничивать в необходимых пределах, в том числе делать ток КЗ равным нулю. Это осуществляется снижением частоты управления или, что то же самое, увеличением паузы [6]. Для схемы рис.2 расчёт показывает, что для удержания тока КЗ в пределах 500–564,5 А необходима пауза 12 мс, т.е. частоту управления необходимо понизить до уровня порядка 80 Гц.

## Квантовые свойства преобразователя

**1. Длительность паузы.** В режимах высоких значений нагрузок длительность паузы небольшая (5–10 мкс). В других режимах, пауза может существенно превышать длительность активного интервала. Так, для схемы рис.2 длительность активного интервала (длительность колебания) составляет около 0,12 мс, а при КЗ и ХХ длительность паузы многократно больше (при ХХ пауза около 100 мс, при КЗ – около 12 мс). При таком многократном различии интервала паузы и длительности колебания процессы в схеме КП целесообразно рассматривать не традиционным способом, используя непрерывные функции, а на основе математического аппарата  $\delta$ -функций. Такой  $\delta$ -функцией является вольт-секундный квант  $V_q$ . На выходную  $L_n R_n$ -цепь преобразователя воздействует напряжение конденсатора  $u_{C0}$ . Для этой цепи можно записать:

$$u_{C0} = L_n \frac{di_n}{dt} + i_n R_n. \quad (4)$$

Проинтегрировав это выражение на интервале колебания  $T_0$ , получим:

$$\int_t^{t+T_0} u_{C0} dt = L_n \Delta i_n + i_n R_n T_0; \quad (5)$$

$$i_n = \frac{i_{n(-)} + i_{n(+)}}{2}; \quad \Delta i_n = i_{n(+)} - i_{n(-)}. \quad (6)$$

С небольшим приближением длительность активного интервала принята равной периоду колебания контура  $T_0$ . Для одного активного интервала ( $T_0$ ) из (1) и (5) следует:

$$V_q(t) = L_n \Delta i_n + i_n R_n T_0. \quad (7)$$

Для  $h = m - n$  активных интервалов можно записать с учётом выражения  $V_{qk} = V_q(t_k) = V_q = \text{const}$ :

$$hV_q = \sum_n^m V_{qk} = L_n \sum_n^m \Delta i_{nk} + (m-n)i_{nk} R_n T_0. \quad (8)$$

Если моменты  $t_k$  следуют равномерно ( $t_k = k\Delta t_k$ ,  $\Delta t_k = \text{const}$ ,  $k = 1, 2, 3 \dots$ ), то преобразователь будет выдавать постоянный ток (неизменный по значению, нарастающий или спадающий). Левая часть равенства (8) представляет рёшетчатую функцию из  $\delta$ -импульсов  $V_q$  неизменного значения (что было показано в разделе 2 режимов работы КП). При распределении импульсов по оси времени по синусоидальному закону:

$$\Delta t_k = A(1 - \sin \omega t_k); \quad t_k = \sum_k \Delta t_k, \quad (9)$$

где  $A$  – коэффициент, преобразователь будет

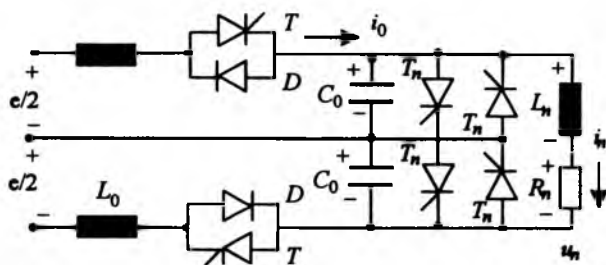


Рис.5. Квантовый преобразователь с выходом переменного тока

выдавать переменное напряжение ступенчатой формы, огибающая которого является синусоидой с частотой  $\omega$ .

Установившиеся режимы удовлетворяют условию

$$\Delta i_{nk} = 0. \quad (10)$$

Следует учитывать, что с математической точки зрения дискретная процедура анализа процессов правомерна для процессов, удовлетворяющих условию:

$$\omega_0 = 2\pi F_0 \gg \omega. \quad (11)$$

**2. Квантовый преобразователь с переменным током на выходе.** Схема квантового преобразователя, генерирующего переменное напряжение на выходе, представлена на рис.5. На выходе преобразователя формируется напряжение с частотой 50 Гц. Частота управления КК модулируется на интервалах, длящихся 0,02/12 с. На выходе преобразователя формируется переменный ток с довольно низким уровнем искажений. Более высокое качество выходного тока может быть получено при более точном распределении во времени по синусоидальному закону активных интервалов ( $T_0$ ), тогда получается практически идеально чистая синусоидальная кривая тока, осциллограмма которой в связи с тривиальностью не приводится.

## Выводы

1. Квантовый способ преобразования электроэнергии решает проблемы преобразователей автономных систем электроснабжения.

2. Квант электроэнергии генерируется колебательным LC-контуром. Схема квантового преоб-

разователя обеспечивает независимость колебаний контура от нагрузки преобразователя. Кванты энергии контура преобразуются выходными устройствами преобразователя в постоянное или переменное напряжение с регулируемыми параметрами.

3. Квантовый преобразователь сохраняет устойчивость работы во всех эксплуатационных режимах: нормальные режимы нагрузки от малой нагрузки до номинальной и заданной перегрузки, при коротком замыкании в цепи нагрузки, при аномальных перегрузках от выше заданной до короткого замыкания.

4. Высокие массогабаритные и другие экономические показатели квантовых преобразователей обеспечиваются повышенной частотой колебательного контура, возможностью использования частотных тиристорных, а также современных частотных электромагнитных материалов, конденсаторов и другого электротехнического оборудования современного производства.

## Список литературы

1. Толстов Ю.Г. Автономные инверторы // Преобразовательные устройства в электротехнике. М.: Наука, 1964.
2. Васильев А.С. Статические преобразователи частоты для индукционного агрегата. М.: Энергия, 1974.
3. Пат. 2085013, пат. 2108653 РФ. Статический преобразователь с квазирезонансной коммутацией тока / В.А.Чванов, В.И.Сидоров. 1992, 1995.
4. Castilla M. et al. On the Design of Sliding Mode Control Schemes for Quantum Resonant Converters // IEEE Tr. on Power Electronics. 2000. Vol. 15, № 6.
5. Shamala A. et al. ADSP Controlled Variable-Frequency Resonant-Commutated Converter // IEEE Tr. on Power Electronics. 2000. Vol. 15, № 3.
6. Чванов В.А. Преобразователи с дозированной передачей электроэнергии // Электричество. 2005. № 6. С. 46–53.
7. Каталог фирмы "Семикрон", 2004.
8. Акимов П.И., Покровский С.В., Чванов В.А. Перспективные конструкции трансформаторов, реакторов и трансформаторов-выпрямителей // Сб. докладов. Симпозиум "Электротехника 2010", ТРАВЭК, 1995. Т. 1.
9. Чванов В.А., Покровский С.В., Останенко Е.И. и др. Электротехническое оборудование и новые системы охлаждения экологически чистыми жидкостями // Сб. докладов. Симпозиум "Электротехника 2010", ТРАВЭК, 1995. Т. 2.
10. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление и его приложения к задачам электротехники. М.-Л.: Энергия, 1964.



# Стойкость тиристоров к эффекту $du/dt$ с учётом лавинного умножения электронов и дырок

ДЕРМЕНЖИ П.Г., ЛОКТАЕВ Ю.М., СТАВЦЕВ А.В., ЧЕРНИКОВ А.А.

Теоретически и экспериментально исследован эффект  $du/dt$  в тиристорах с учётом лавинного умножения электронов и дырок в области пространственного заряда коллекторного  $p$ - $n$ -перехода. Исследования проведены в диапазоне напряжений в закрытом состоянии от  $2/3$  повторяющегося напряжения до значений, близких к напряжению переключения. Теоретические и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой. Результаты исследований будут полезны при создании тиристоров, самозащищённых от пробоя при переключении без внешнего сигнала управления.

Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии  $(du_D/dt)_{crit}$  является одним из важнейших параметров, характеризующим стойкость тиристоров к эффекту  $du/dt$ . В соответствии с действующими стандартами стойкость тиристоров к эффекту  $du/dt$  проверяется путём приложения к ним в закрытом состоянии импульсов напряжения с амплитудой  $U_{DM}$ , равной  $2/3$  повторяющегося напряжения  $U_{DRM}$ . Для современных мощных высоковольтных тиристоров значения  $(du_D/dt)_{crit}$ , оговоренные в каталогах и информационных материалах, достигают 2000–2500 В/мкс.

Приложение к тиристорам в закрытом состоянии импульсов напряжения, нарастающих со скоростями  $du_D/dt$ , превышающими  $(du_D/dt)_{crit}$ , не обязательно означает, что тиристоры переключатся и выйдут из строя. Это связано с тем, что значения  $(du_D/dt)_{crit}$  проверяются, а не измеряются. При этом истинное значение  $(du_D/dt)_{crit}$  для конкретного тиристора остаётся неизвестным. Поэтому практически до конца XX века ни одна компания, производящая тиристоры, не допускала включения тиристоров путём приложения к ним в закрытом состоянии импульсов напряжения, нарастающих со скоростями  $du_D/dt$ , превышающими  $(du_D/dt)_{crit}$ .

Таким образом, этот режим был одним из трёх неразрешённых "динисторных" (без внешнего сигнала управления) режимов включения мощных тиристоров. Двумя другими запрещёнными режимами являются включения мощных тиристоров путём приложения перенапряжений (импульсов напряжения, нарастающих со скоростями ниже критической) и путём приложения импульсов прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств (при  $t < t_q$ , где  $t_q$  – время выключения тиристора).

Исследования по расширению областей безопасной работы мощных тиристоров (фототири-

*Effect  $du/dt$  in thyristors was investigated theoretically and experimentally taking into account avalanche multiplication of electrons and holes in space charge region of collector  $p$ - $n$  junction. Investigations were performed in the voltage range from  $2/3$  of repetitive off-state voltage to the values closed to breakover voltage. Theoretical and experimental data are in good agreement. Results of investigations will be useful during development of the thyristors self-protected from damage in case of switching without external gate current.*

торов) на эти режимы велись давно. Однако только в конце XX века появилась статья сотрудников компаний "Siemens" и "Euprec" (ФРГ), в которой сообщалось о создании фототиристоров, допускающих включение во всех трёх "динисторных" режимах [1]. В соответствии с тематикой нашей работы в этой статье мы прежде всего обратили внимание на весьма высокую стойкость фототиристоров к эффекту  $du/dt$  (5,5 кВ/мкс при  $U_{DM} \approx 0,84 U_{BO}$  и  $90^\circ\text{C}$ , где  $U_{BO}$  – напряжение переключения фототиристоров). Это было тем более удивительно, что в каталоге компании Euprec [2] для всех аналогичных фототиристоров даже в стандартных режимах испытаний значения  $(du_D/dt)_{crit} = 2000$  В/мкс.

В этой связи представлялось интересным хотя бы для одного из отечественных тиристоров исследовать стойкость к эффекту  $du/dt$  в нестандартных режимах, учитывая при этом лавинное умножение электронов и дырок при высоких напряжениях.

Эксперимент был проведён на базе тиристоров типа T143-630 с диаметром выпрямительного элемента 40 мм. Максимальные значения  $U_{DRM}$  для этих тиристоров равны 1800 В. Выпрямительные элементы изготавливались на основе кремниевых пластин  $n$ -типа электропроводности с удельным сопротивлением  $\rho_n = 65$  Ом·см. Толщина пластин была  $440 \pm 10$  мкм. Глубина диффузии алюминия составляла примерно 80 мкм, а бора – около 35 мкм (на уровне концентрации доноров  $N_{do}$  в исходном кремнии). Поверхностные концентрации алюминия и бора были равны примерно  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , соответственно. Глубина диффузии фосфора в эмиттерном  $n^+$ -слое была равна примерно 20 мкм, а поверхностная концентрация – примерно  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau_{n,н.з.}$  регулировалось облучением электронами и было равно примерно 6 мкс.

Таблица 1

Напряжение в закрытом состоянии $U_D$ , В	Ток в закрытом состоянии $I_D$ , мА, при 125°C								
	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
	№1-1	№1-2	№1-3	№2-1	№2-2	№2-3	№3-1	№3-2	№3-3
1800	20	12	25	25	30	25	27	25	20
2000	29	15	33	33	37	33	37	31	27
2200	39	22	50	50	55	49	47	47	42

Выпрямительные элементы были изготовлены с тремя вариантами шунтировки катодного  $n^+$ - $p$ -перехода. Для всех вариантов диаметры шунтов (по фотошаблону) были одинаковыми и равными 120 мкм. Кратчайшее расстояние между центрами соседних шунтов было равно 400, 600 и 800 мкм для вариантов 1, 2 и 3, соответственно.

Всего были отобраны для испытаний 9 выпрямительных элементов (по 3 выпрямительных элемента каждого варианта). На отобранных выпрямительных элементах были измерены токи в закрытом состоянии  $I_D$  при температуре 125°C и трёх значениях напряжения  $U_D$ : 1800, 2000 и 2200 В. Результаты этих измерений, представленные в табл.1, были использованы для оценки коэффициента лавинного умножения  $M_g$  генерационного тока коллекторного  $p$ - $n$ -перехода  $I_{гк}$  и сравнения полученных результатов с расчётными.

Результаты проверки стойкости выпрямительных элементов к эффекту  $du/dt$  при 125°C представлены в табл.2.

**Теоретические исследования.** Методика расчёта стойкости тиристоров к эффекту  $du/dt$  была разработана ещё в 1973 г. [3] и более детально изложена в [4]. Однако в [3,4] не учитывалось лавинное умножение электронов и дырок в области пространственного заряда коллекторного  $p$ - $n$ -перехода, которое становится существенным при высоких напряжениях. Не останавливаясь на подробных выкладках, аналогичных приведённым в [3,4], выражение для расчёта критической скорости нарастания напряжения с учётом лавинного умножения электронов и дырок представим в виде:

$$\int_0^{t_0} c_k(u)(du/dt)_{cr} \exp(-t/\tau_n) dt = \tau_n (J_{ro} M_n \beta_{pn}(\tau_n) - J_{kg} M_g), \quad (1)$$

Таблица 2

Режим испытаний	Результаты испытаний
$U_{DM} = 1400$ В, $du_D/dt = 5000$ В/мкс	Выдержали все
$U_{DM} = 1900$ В, $du_D/dt = 6000$ В/мкс	Выдержали все
$U_{DM} = 1900$ В, $du_D/dt = 6500$ В/мкс	Выдержали все, кроме №3-1 и №3-3

где  $t_0$  – длительность фронта нарастания импульса напряжения в закрытом состоянии;  $c_k(u)$  – удельная барьерная ёмкость коллекторного  $p$ - $n$ -перехода, зависящая от напряжения;  $(du/dt)_{cr}$  – истинная (в отличие от  $(du_D/dt)_{crit}$ ) критическая скорость нарастания в закрытом состоянии, при малейшем превышении которой тиристор включается;  $\tau_n$  – постоянная времени нарастания тока при включении тиристора;  $J_{ro}$  – плотность тока, протекающего через шунты катодного  $n^+$ - $p$ -перехода в критическом состоянии, предшествующем включению тиристора;  $M_n$  и  $M_g$  – коэффициенты лавинного умножения электронов и генерационного тока коллекторного  $p$ - $n$ -перехода, соответственно;  $\beta_{pn}(\tau_n)$  – значение изображения коэффициента переноса электронов через  $p$ -базу по Лапласу–Карсону при операторе преобразования, равном  $1/\tau_n$ ;  $J_{kg}$  – плотность генерационного тока коллекторного  $p$ - $n$ -перехода. Все перечисленные параметры зависят от анодного напряжения.

Левая часть выражения (1) представляет собой плотность заряда, накапливаемого в базовом  $n$ -слое тиристора под воздействием ёмкостного тока коллекторного  $p$ - $n$ -перехода. Обозначим её как  $Q_{ac}$ . Правая часть выражения (1) представляет собой критическую плотность заряда в базовом  $n$ -слое, при малейшем превышении которой происходит включение тиристора. Обозначим её как  $Q_{cr}$ . Выражение (1) остаётся справедливым до тех пор, пока  $Q_{cr} < Q_{acm}$ , где  $Q_{acm}$  – максимально возможное значение интеграла в левой части (1) при  $t_0 \rightarrow 0$ . В противном случае тиристор не включается при любых скоростях нарастания напряжения в закрытом состоянии.

Критическая плотность тока включения тиристора  $J_{cr}$  рассчитывалась по формуле:

$$J_{cr}(1 - \gamma_{ncr} \beta_{po} M_n - \alpha_{pnrcr} M_p) = J_{kg} M_g, \quad (2)$$

где  $\beta_{po}$  – стационарный коэффициент переноса дырок через  $p$ -базу;  $\gamma_{ncr}$  – коэффициент инжекции катодного  $n^+$ - $p$ -перехода при плотности тока  $J = J_{cr}$ ,

$$\gamma_{ncr} = 1 - \frac{kT}{qR_{ko}J_{cr}} \ln \left( \frac{\gamma_{ncr}J_{cr}}{J_{sn3}} + 1 \right); \quad (3)$$

$k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – заряд электрона;  $R_{ko}$  – удельное эк-

вивалентное сопротивление шунтировки катодного  $n^+-p$ -перехода, Ом·см<sup>2</sup>;  $J_{sn3}$  – плотность электронного тока насыщения катодного  $n^+-p$ -перехода;  $M_p$  – коэффициент лавинного умножения дырок;  $\alpha_{pnpr}$  – коэффициент усиления составного  $p-n-p$ -транзистора при  $J = J_{cr}$

$$\alpha_{pnpr} = (\gamma_p \beta_{nn} + \alpha_{pnpe} J_{cr}/J_0) / (1 + J_{cr}/J_0); \quad (4)$$

$\gamma_p$  – коэффициент инжекции анодного  $p^+-n$ -перехода;  $\beta_{nn}$  – стационарный коэффициент переноса дырок через  $n$ -базу при низких уровнях инжекции;  $\alpha_{pnpe}$  – стационарный коэффициент усиления составного  $p-n-p$ -транзистора при высоких уровнях инжекции в  $n$ -базе,

$$\alpha_{pnpe} = \frac{1}{b+1} \left\{ 1 + [(1+b)\gamma_p - 1] \operatorname{sch} \left( \frac{W_{nx}}{L_{ph}} \right) \right\}; \quad (5)$$

$b$  – отношение подвижностей электронов и дырок в кремнии ( $b \approx 2,8$ );  $W_{nx}$  – толщина электронной нейтральной части  $n$ -базы при заданном напряжении;  $L_{ph}$  – диффузионная длина дырок в  $n$ -базе при высоких уровнях инжекции;  $J_0$  – нормирующий делитель, согласно [5]

$$J_0 \approx 10qD_p N_{do}/L_p; \quad (6)$$

$D_p$  – коэффициент диффузии дырок в кремнии;  $L_p$  – диффузионная длина дырок в  $n$ -базе при низких уровнях инжекции.

Постоянная времени  $\tau_n$  с учётом лавинного умножения электронов и дырок рассчитывалась по формуле:

$$\beta_{pn}(\tau_n)M_n + \alpha_{pnpr}(\tau_n)M_p = 1, \quad (7)$$

где  $\alpha_{pnpr}(\tau_n)$  – значение изображения коэффициента усиления составного  $p-n-p$ -транзистора тиристора по Лапласу-Карсону при операторе преобразования, равном  $1/\tau_n$ .

Мы не приводим громоздких выражений для расчётов  $\beta_{pn}(\tau_n)$  и  $\alpha_{pnpr}(\tau_n)$ . Их можно найти во многих работах, включая и [4,5]. В [5] можно найти также формулы для расчётов  $M_n$ ,  $M_p$  и  $M_g$ . Заметим только, что при расчётах  $\beta_{pn}(\tau_n)$  учитывался диффузионно-дрейфовый перенос электронов через  $p$ -базу.

Температурные зависимости  $M_n$ ,  $M_p$  и  $M_g$  учитывались аналогично тому, как это предложено в [4]: константы в показателях экспоненциальных зависимостей коэффициентов ударной ионизации электронами и дырками от напряжённости электрического поля умножались на коэффициент

$$g = \exp[E_{ph}/(kT_0)] \exp[E_{ph}/(kT)], \quad (8)$$

где  $E_{ph}$  – энергия оптических фононов в кремнии, равная 0,063 эВ;  $T_0 = 300$  К.

Выражение (2) позволяет рассчитывать не только  $J_{cr}$ , но и плотность тока в закрытом состоянии  $J_D$ , заменив всюду в формулах (2)–(4)  $J_{cr}$  на  $J_D$ . При этом коэффициент инжекции катод-

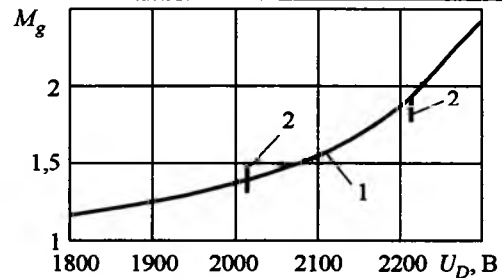


Рис.1. Зависимость коэффициента лавинного умножения  $M_g$  от напряжения в закрытом состоянии  $U_D$ :

1 – теория; 2 – эксперимент

ного  $n^+-p$ -перехода  $\gamma_n$  практически равен 0, а коэффициент усиления составного  $p-n-p$ -транзистора  $\alpha_{pnpr} \approx \gamma_p \beta_{nn}$ .

С учётом сказанного формула (2) была использована для оценки значений  $M_g$  при  $U_D = 2000$  и  $2200$  В. Для этого предполагалось, что при  $U_D = 1800$  В значения  $M_g$  и  $M_p$  равны расчётным (соответственно 1,17 и 1,008), а при  $U_D = 2000$  и  $2200$  В отношения  $M_p/M_g$  равны расчётным (соответственно 0,748 и 0,578). Сначала при  $U_D = 1800$  В рассчитывались  $W_{nx}$ ,  $\alpha_{pnpr}$ , толщина области пространственного заряда коллекторного  $p-n$ -перехода  $W_{он.з}$  и  $J_{kg}$  (с учётом данных табл.1). Затем при  $U_D = 2000$  и  $2200$  В значения  $J_{kg}$  увеличивались пропорционально  $W_{он.з}$  при этих напряжениях, снова рассчитывались  $W_{nx}$ ,  $\alpha_{pnpr}$  и с учётом данных табл.1 по формуле (2) рассчитывались значения  $M_g$ . Расчёты были выполнены при двух значениях  $\gamma_p$ : 1 и 0,5. Результаты расчётов при  $\gamma_p = 0,5$  представлены на рис.1. Результаты расчётов при  $\gamma_p = 1$  отличались от них в пределах 2–9%. Видно хорошее соответствие между значениями  $M_g$ , рассчитанными по теоретическим формулам, приведённым в [5], и по результатам измерений  $I_D$ .

При вычислении интеграла в левой части (1) профиль распределения алюминия в окрестности коллекторного  $p-n$ -перехода аппроксимировался экспоненциальной функцией и координата границы области пространственного заряда коллекторного  $p-n$ -перехода в  $n$ -базе в любой момент времени рассчитывалась по формулам, аналогичным [6].

Для численных расчётов стойкости тиристоров к эффекту  $du/dt$  была использована система приборно-схемотехнического моделирования "ИСТОК". Исследования проводились по простейшей схеме, представленной на рис.2, где  $E$  – источник идеальных импульсов напряжения трапецеидальной формы. Сопротивление балластного резистора  $R$  выбиралось таким, чтобы дальнейшее уменьшение его не влияло на расчётную стойкость тиристоров к эффекту  $du/dt$ .

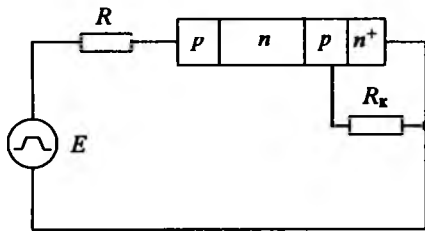


Рис.2. Схема для расчётов стойкости тиристоров к эффекту  $du/dt$  по системе «ИСТОК»

Значения  $R_k$  для выпрямительных элементов вариантов 1, 2 и 3, рассчитанные по методике, предложенной в [4], составляли, соответственно, 0,013, 0,032 и 0,0637 Ом. На рис.3 приведены зависимости  $(du/dt)_{cr}$  от  $U_{DM}$ , рассчитанные в случае варианта 3 с использованием системы «ИСТОК» и по формуле (1) с учётом (2)–(8) при  $\gamma_p = 0,5$  и 1, а на рис.4 – расчётная зависимость  $(du/dt)_{cr}$  от  $R_k$  при  $U_{DM} = 1900$  В и  $\gamma_p = 0,5$ .

**Обсуждение результатов.** Из сравнения данных, приведённых в табл.2 и на рис.3, видно, что система «ИСТОК» даёт заниженное значение  $(du/dt)_{cr}$  при  $U_{DM} = 1900$  В. Это обусловлено, очевидно, тем, что в системе «ИСТОК» не учтены температурные зависимости коэффициентов ионизации электронами и дырками, а также не предусмотрено задание генерационного времени жизни электронов и дырок в области пространственного заряда коллекторного перехода. Вследствие этого напряжение переключения тиристора  $U_{BO}$ , рассчитанное по системе «ИСТОК», равно примерно 2000 В, в то время как значение  $U_{BO}$ , рассчитанное по методике, описанной в [5], равно 2390 В, что лучше соответствует экспериментальным данным.

Однако расчёты по системе «ИСТОК» позволили оценить значение  $\gamma_p$ , поскольку она выводит распределения электронного и дырочного токов по толщине кремниевой структуры. Оказалось, что  $\gamma_p \approx 0,5$ . Поэтому на рис.3 и 4 приведены расчётные зависимости  $(du/dt)_{cr}$  при  $\gamma_p = 0,5$ . Из табл.2 и рис.3 и 4 следует, что в случае выпря-

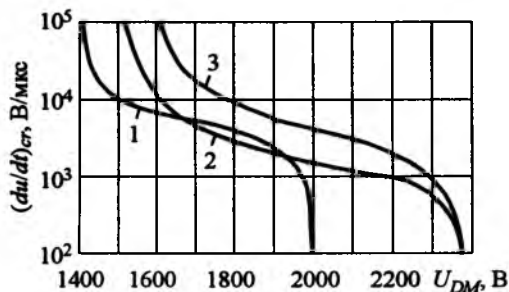


Рис.3. Расчётные зависимости  $(du/dt)_{cr}$  от амплитуды  $U_{DM}$  импульсов напряжения:

1 – по системе «ИСТОК», 2 и 3 – по формуле (1), соответственно, при  $\gamma_p = 1$  и  $0,5$

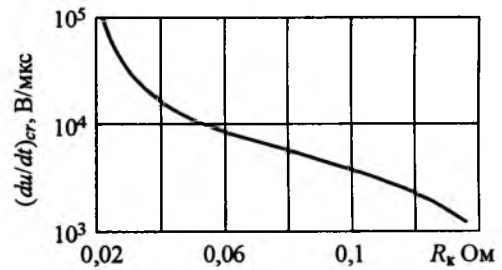


Рис.4. Расчётная зависимость  $(du/dt)_{cr}$  от сопротивления шунтировки катодного  $n^+$ - $p$ -перехода  $R_k$

мительных элементов варианта 3 расчётные значения  $(du/dt)_{cr}$  лучше соответствуют экспериментальным при  $\gamma_p = 0,5$ . Из табл.2 и рис.4 видно также, что экспериментально достигнутые наибольшие значения скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии (6500 В/мкс) существенно меньше расчётных значений  $(du/dt)_{cr}$  в случае вариантов 1 и 2 (соответственно,  $1,28 \cdot 10^5$  и  $1,61 \cdot 10^4$  В/мкс).

Тот факт, что один из выпрямительных элементов варианта 3 (№3-2 в табл.2) выдержал приложение импульса напряжения, нарастающего со скоростью 6500 В/мкс, а два других не выдержали, объясняется, очевидно, следующим. Все приведённые расчёты были выполнены в предположении, что глубина диффузии фосфора в эмиттерном  $n^+$ -слое  $X_{jp} = 20$  мкм. Однако фактические значения  $X_{jp}$  могут отличаться от принятого в ту или иную сторону по меньшей мере на 1 мкм. При этом расчётное значение  $(du/dt)_{cr}$  падает до уровня 5400 В/мкс, если  $X_{jp} = 21$  мкм, и возрастает до уровня 9100 В/мкс, если  $X_{jp} = 19$  мкм. Существенное влияние на фактические значения  $(du/dt)_{cr}$  оказывает и разброс других параметров кремниевой структуры, например, уровня легирования базового  $p$ -слоя. Поэтому не следует ожидать идеального совпадения расчётных и экспериментальных данных.

## Выводы

1. Современные тиристоры с эффективной технологической шунтировкой эмиттерного  $n^+$ - $p$ -перехода обладают высокой стойкостью к эффекту  $du/dt$  вплоть до напряжений в закрытом состоянии, близких к напряжению переключения.

2. Указанные в каталогах значения  $(du/dt)_{crit}$  при напряжениях, равных 2/3 повторяющихся напряжений в закрытом состоянии, являются весьма заниженными. Возможно, это объясняется отсутствием соответствующей аппаратуры для подтверждения высоких значений  $(du/dt)_{crit}$ .

3. Расчётные зависимости  $(du/dt)_{cr}$  от  $U_{DM}$  и  $R_k$  будут полезными при создании тиристоров, самозащищённых от пробоя при переключении без внешнего сигнала управления.

## Список литературы

1. Ruff M., Schulze H.-J., Kellner U. Progress in the development of an 8-kV light-triggered thyristor with integrated protection functions// IEEE Trans. Electron Devices. 1999. Vol. 46, No 8. P.1768–1774.
2. Еурес. Power Semiconductors Shortform Catalog 2005.
3. Бородин К.Д., Дерменжи П.Г. Взаимосвязь стойкости *p-n-p-n*-структур к эффекту  $di/dt$  с их параметрами и величиной предварительного смещения прямой и обратной полярности// Радиотехника и электроника. 1973. Т.18, №10. С.2123–2132.

4. Дерменжи П.Г., Кузьмин В.А., Крюкова Н.Н. и др. Расчет силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1980.

5. Григоренко В.П., Дерменжи П.Г., Кузьмин В.А., Минацканов Т.Т. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергоатомиздат, 1988.

6. Rinaldi N. Analysis of depletion layer of exponentially graded *p-n* junctions with nonuniformly doped substrates//IEEE Trans. Electron Devices. 2000, Vol. 47, No 12. P.1768–1774.

## Исследование возможности применения мощных кремниевых шунтов в системе питания сверхпроводящего ускорителя

АСИНА С.С., СМЕРНОВ А.А., КАРПИНСКИЙ В.Н., КОНДРАШОВ Е.И.

Исследованы преимущества применения мощных кремниевых шунтов таблеточного исполнения в схеме эвакуации энергии ускорителя Нуклотрона. Низкая индуктивность таблеточных шунтов позволяет использовать их не только в качестве балластных сопротивлений параллельно включенных тиристоров, но и одновременно как датчики тока для диагностики и защиты устройства.

Шунты переменного тока, нашедшие широкое применение в мощной высокочастотной электронике и мощных импульсных источниках, используемых в электрофизических установках, служат для регистрации токов, нарастающих с высокой скоростью ( $di/dt$ ).

Необходимость воспроизведения импульсов на экране осциллографа без искажения их формы и создания быстродействующей защиты по току требует разработки таких конструкций "безреактивных" шунтов, в которых влияние паразитных факторов (остаточной реактивности, поверхностного эффекта) снижено до минимально возможных значений.

Одним из таких принципиально новых технических решений является создание мощных кремниевых резисторов-шунтов таблеточного исполнения [1]. Например, шунты типа РКш173 изготавливаются из кремния диаметром 76 мм и собираются в корпуса типа КЖТТ-76, используемые для изготовления запираемых тиристоров. Два управляющих вывода такого корпуса необходимы для создания потенциальных контактов шунта. Номинальное сопротивление шунтов ( $R_{ш}=0,0001 \div 0,01$  Ом) регулируется подбором толщины и удельного сопротивления кремниевых пластин. Шунты данного типа отличаются низкими значениями индуктивности (менее 5 нГн),

*The main advantages of silicon press-pack shunt for the application in the energy evacuation switch of the accelerator Nuklotron were investigated. Low inductance of the press-pack shunt let to use it not only as ballast resistors in the parallel connected thyristors, but as current detector for diagnostic and switch protection simultaneously.*

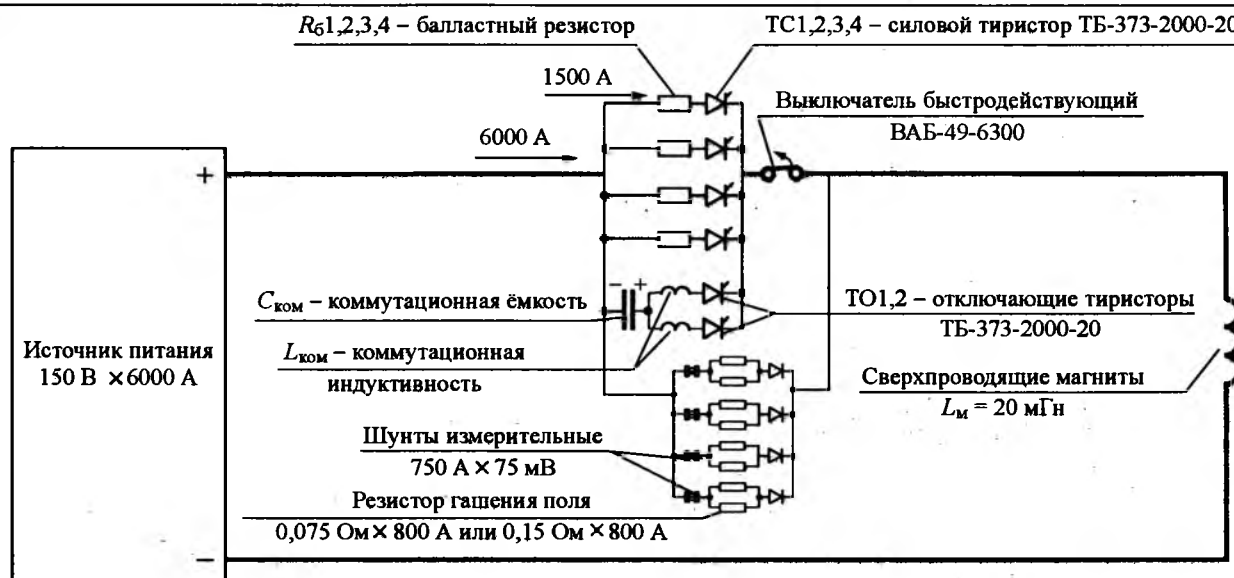
высокими значениями импульсного тока (более 50 кА) и скорости нарастания тока ( $di/dt > 20$  кА/мкс). При этом они требуют соответствующей системы охлаждения, подобной используемой для мощных кремниевых тиристоров (ТБ173 и др.) и диодов (Д173 и др.).

В Лаборатории высоких энергий объединенного института ядерных исследований (ИВЭ ОИЯИ, г.Дубна) с целью повышения энергии ускоренных частиц в сверхпроводящем ускорителе Нуклотроне [2] принято решение о модернизации системы эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов в аварийных режимах за счёт использования современных мощных кремниевых тиристоров и резисторов таблеточного исполнения.

В качестве ключевого элемента использован мощный быстродействующий тиристор ТБ373-2000-20 (ОАО "Электровыпрямитель", г. Саранск), в качестве защитного элемента – мощный кремниевый резистор-шунт РКш173 (ГУН ВЭИ, г. Москва).

На рис.1 изображена упрощенная схема силовой части ключа эвакуации энергии (КЭЭ), запасенной в сверхпроводящих магнитных элементах.

Работа устройства: силовые тиристоры ТС1,2,3,4 включены постоянно и через них протекает ток от 100 до 6000 А. В случае срыва сверхпроводимости включаются отключающие



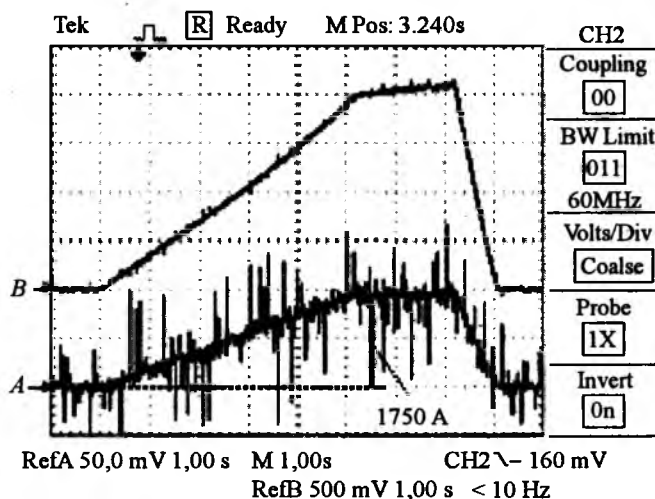
тиристоры  $TO1,2$  и в течение 20–60 мкс ток из цепей  $R_6 - TC$  уходит сначала в цепь  $C_{ком} - L_{ком} - TO1,2$ , а затем в цепь резистора гашения поля.

В качестве силовых (ТС) и отключающих (ТО) тиристоров используются быстродействующие тиристоры ТБ373-2000-20. Первоначально резисторы-шунты РКш173 предполагалось использовать в качестве балластных резисторов ( $R_6$ ). Балластные резисторы предназначены для выравнивания токов в параллельно включённых тиристорах [3].

По предварительным оценкам с учётом режимов эксплуатации и исходных характеристик тиристоров ТБ373-2000-20 к резисторам-шунтам РКш173 предъявляются следующие требования:

- номинальное сопротивление 0,5–1 мОм;
- номинальная мощность не менее 4000 Вт;
- усилие сжатия корпуса 36 кН.

На рис.2 показан общий вид резистора РКш173 и сборки тиристора ТБ373-2000-20 с



РКш173 в единой системе охлаждения (водяные охладители типа ДЖИЦ.432281.014)

В начале тестировались резисторы-шунты РКш173 с  $R_{ном}=1$  мОм. На рис.3 приведены осциллограммы напряжения на измерительном шунте 1500 А x 75 мВ (линия А, масштаб 50 мВ, 1,0 с) и на балластном резисторе-шунте РКш173 (линия В, масштаб 500 мВ, 1,0 с).

Измерения производились осциллографом TDS 1002 А при токе трапецидальной формы с амплитудой 1700 А. Из сравнения кривых обнаружена достаточно чистая форма изменения напряжения на резисторе РКш173: отсутствуют паразитные наводки.

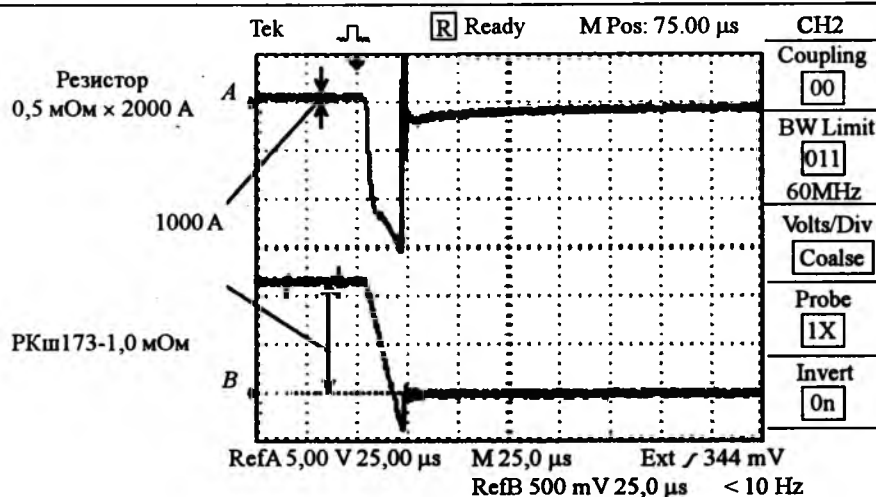


Рис.4

Как и предполагалось, подтверждена низкая индуктивность резисторов РКШ173. На рис.4 приведены осциллограммы коммутации напряжения на резисторе-аналоге 0,5 мОм × 2000 А с водяным охлаждением погружного типа, изготовленном в ЛВЭ (линия A), ранее используемом в качестве балластного, и на резисторе-шунте РКШ173 (линия B) при выводе тока 1000 А.

При скорости изменения тока примерно 50 А/мкс выброс обратного напряжения на резисторе 0,5 мОм × 2000 А составляет около 15 В при полезном сигнале 0,53 В, тогда как на резисторе-шунте РКШ173 выброс обратного напряжения всего лишь примерно 0,4 В при полезном сигнале около 1,2 В, что свидетельствует о его более высоком КПД.

Однако на резисторе-шунте РКШ173 с  $R_{\text{ном}} = 1 \text{ мОм}$  в сравнении с аналогом отмечается нагрев корпуса, который составил при постоянном токе 1750 А примерно 50°C, что ниже допустимой температуры корпуса 85°C и в принципе является допустимым при номинальной мощности резистора 4000 Вт.

Дальнейшие испытания проводились с использованием резисторов-шунтов РКШ173 с  $R_{\text{ном}} = 0,5 \text{ мОм}$ . При этом отмечен меньший нагрев корпусов резисторов-шунтов (27–31°C), что обусловлено меньшей выделяемой мощностью.

Низкое значение индуктивности РКШ173 позволяет использовать его в качестве не только балластного сопротивления, но и датчика тока каждого параллельно соединённого силового тиристора, оперативно отслеживать токовую загрузку

ку тиристоров и в случае необходимости передачу сигнала в схему защиты, таким образом повышая надёжность работы КЭЭ в целом.

К основным результатам проведённых исследований следует отнести:

- использование резисторов-шунтов РКШ173 в ключе эвакуации энергии позволило обеспечить надёжное одновременное включение 4 параллельно включённых тиристоров и их равномерную токовую загрузку;
- низкое значение индуктивности кремниевых таблеточных резисторов-шунтов с  $R_{\text{ном}} = 0,5 \pm 1 \text{ мОм}$ , используемых в качестве балластных, расширяет их функциональные возможности, т.е. позволяет использовать их одновременно в качестве датчиков быстрокоммутируемых токов для диагностики и защиты устройства;
- простота конструкции резистора-шунта РКШ173 и удобство монтажа в единой системе охлаждения с тиристорами ТБ373 позволяют уменьшить издержки при изготовлении и эксплуатации ключа.

#### Список литературы

1. Asina S.S., Surma A.M., Gorkin E.V. Power Low-inductance Press-pack Silicon Shunt // Proceedings of 34. International Conference Power Conversion. Intelligent Motion (PCIM '97). P.541–545.
2. Смирнов А.А. Нуклотрон – новая технология сверхпроводящей магнитной системы синхротрона // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2001. Т.32, вып.1. С.96–141.
3. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры / Под ред. В.Я. Замятина, Б.В. Кондратьева, В.М. Петухова. М.: Радио и связь, 1988. С.30.



## Вольт-амперные характеристики полупроводящих лент и эмалей

МАСЛОВ В.А., ПАНОВ А.А., КРУПЕНИН Н.В., ГРОЗДОВ А.Г.

Представлены данные по технологическим, электрическим и механическим характеристикам полупроводящих эмалей и лент. Для эмалей и лент с нелинейной зависимостью токов утечки от напряжённости электрического поля приведены вольт-амперные характеристики. Изучено влияние вакуум-нагнетательной пропитки эпокси-ангидридным компаундом на изменение характеристик полупроводящих лент. Показано, что полупроводящие ленты, разработанные ГУП ВЭИ стойки к действию пропиточного компаунда.

Электрическая и механическая прочность изоляции во многом обеспечивают работоспособность электрических машин. Выход из строя изоляции обусловлен как общим её старением, так и различными дефектами в виде истирания, разрывов изоляции, механическими повреждениями. Немалую роль в пробое изоляции могут играть разрушения ионизационного характера из-за сильной короны, искрения и пазовых разрядов [1,2].

Для предотвращения образования короны на стержнях обмотки, особенно в её лобовой части, необходимо нанесение противокоронной защиты в виде эмалей или лент с определённым удельным поверхностным электрическим сопротивлением. Очень важно правильно рассчитать геометрию нанесения и подбор сопротивления последовательных ступеней покрытия в зависимости от рабочего и испытательного напряжения электрической машины [3,4]. Разумеется, немаловажно качество выбранных материалов и их поведение в процессе намотки, пропитки и других технологических операций.

В нормативно-технической документации для определения удельного поверхностного электрического сопротивления полупроводящих покрытий заложен метод, основанный на измерении сопротивления участка покрытия с помощью мегаомметра при напряжении 500, 1000 и 2500 В.

Низкоомные покрытия с сопротивлением до  $5 \cdot 10^5$  Ом измеряют при напряжении 500 В, высокоомные покрытия с сопротивлением  $1 \cdot 10^7$  –  $9 \cdot 10^9$  Ом – при 2500 В.

Если для низкоомных покрытий такие измерения достаточны, то для высокоомных покрытий, которые, как правило, имеют нелинейную зависимость сопротивления от напряжённости электрического поля, измерение при одном значении напряжённости малоинформативно.

Data on processing, electrical and mechanical characteristics of semiconducting enamels and tapes are presented. The current-voltage characteristics for enamels and tapes with a nonlinear dependence of the leakage currents on the electric field strength are given. The effect of VPI by an epoxy-anhydride compound on the changes in the properties of the semiconducting tapes is investigated. It is shown that the semiconducting tapes developed in GUP VEI are resistant to the action of the impregnating compound.

В табл.1 и 2 приведены характеристики разработанных нами полупроводящих эмалей и лент. Представленный ряд полупроводящих материалов перекрывает весь диапазон по сопротивлению при различных уровнях напряжённости электрического поля вплоть до 10 кВ/см. Эти эмали и ленты можно применять в различных комбинациях как для электрических машин с рабочим напряжением 6 кВ, так и для крупных турбогенераторов с рабочим напряжением 24 кВ и, соответственно, с возможным испытательным напряжением до 70 кВ.

Области ВАХ и зависимостей поверхностного электрического сопротивления от напряжённости для различных марок эмалей и лент приведены на рис.1–4. Измерение ВАХ проводили на специальном приборе, позволяющем непрерывно снимать зависимость токов утечки от напряжения в диапазонах 0–100 мкА и 0–70 кВ. Далее после обработки данных с учётом геометрии образца эти данные преобразовывались в указанные графики.

Представленные диапазоны ВАХ для каждой марки материалов являются результатом измерений серий образцов от различных опытных партий эмалей или лент. Небольшой разброс по ВАХ указывает на стабильность получаемых материалов.

Для сравнения на рис.5 приведены ВАХ полупроводящих лент фирмы "Vonroll Isola".

Разработанные нами технологии получения полупроводящих эмалей и лент позволяют варьировать ВАХ в очень широких пределах.

При изготовлении высоковольтных электрических машин по технологическому процессу очень часто используется вакуум-нагнетательная пропитка по системе монолит-2 эпоксидангидридным компаундом. Процесс пропитки и последующее отверждение очень длительны.

Таблица 1

## Характеристики полупроводящих эмалей (ТУ 2312-004-43286062-2006)

Показатель	ППЭ-1	ППЭ-2	ППЭ-3
Внешний вид покрытия из эмали	Однотонная гладкая полуматовая поверхность черного цвета	Однотонная гладкая полуматовая поверхность от светло-серого до темно-серого цвета	Однотонная гладкая полуматовая поверхность светло-серого или зеленовато-серого цвета
Условная вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре $(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ , с	30–80	100–230	100–230
Массовая доля нелетучих веществ, %	49–57	75–85	75–85
Время высыхания пленки лака до степени 3 при температуре $18-25^\circ\text{C}$ , ч, не более	24	24	24
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом, не менее ( $R, M$ ( $15-35^\circ\text{C}$ )) 45–75%)	$1 \cdot 10^3 - 9 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^7 - 9 \cdot 10^9^*$	$1 \cdot 10^7 - 9 \cdot 10^9^{**}$
* $E = 0,5 \div 5$ кВ/см			
** $E = 4,5 \div 10$ кВ/см			

Таблица 2

## Характеристики полупроводящих лент (ТУ 3491-022-00216415-00)

Характеристики полупроводящих лент (15-34) 1-622-66216-66)										
Показатель	ППЛ-1				ППЛ-2			ППЛ-3/1/2		
Ширина, мм	20±2	15±2	20±2	25±2	15±2	20±2	25±2	15±2	20±2	25±2
Толщина, мм	0,09±0,02	0,11±0,02			0,11±0,02			0,11±0,02		
Разрывная нагрузка на ширину ленты, Н, не менее	250	300	350	400	300	350	400	300	350	400
Удельное поверхностное сопротивление, Ом	1,0·10 <sup>3</sup> – 5,0·10 <sup>5</sup>				6,0·10 <sup>5</sup> – 9,0·10 <sup>6</sup>			1,0·10 <sup>7</sup> – 9,0·10 <sup>9*</sup>		
* ППЛ-3/1 E = 0,5÷3,5 кВ/см ППЛ-3/2 E = 1,5÷9,0 кВ/см										

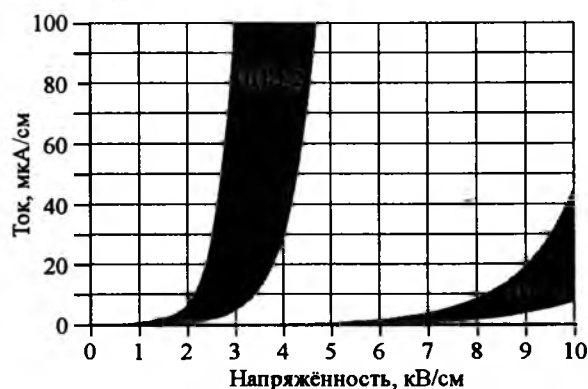


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики эмалей



Рис. 3. Вольт-амперные характеристики лент



Рис. 2. Зависимость поверхностного электрического сопротивления эмалей от напряженности

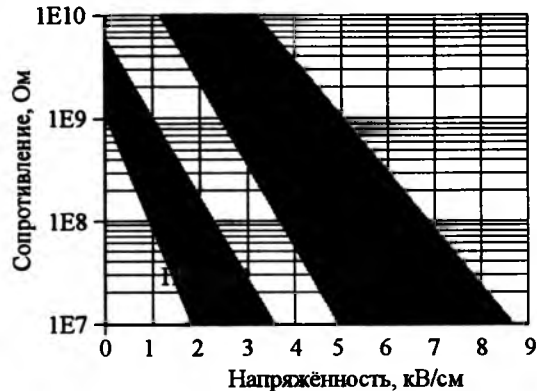


Рис. 4. Зависимость поверхностного электрического сопротивления лент от напряженности

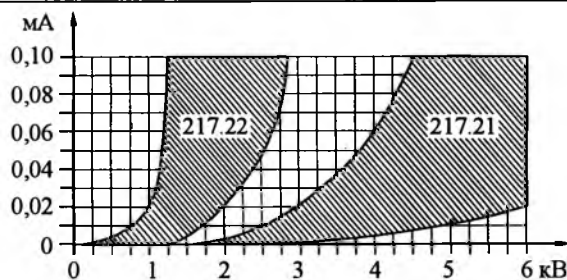


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики полупроводящих лент фирмы "Vonroll Isola"

Полупроводящие ленты, используемые для противокоронной защиты, наносятся поверх изоляции на основе стеклослюдинитовых лент, как правило, они не содержат ускорителя отверждения. В этом случае эпоксидангидридный компаунд отверждается очень длительное время.

Поскольку и изометилтетрагидрофталевый ангидрид и эпоксидные смолы при повышенных температурах достаточно агрессивны и возможна химическая деструкция связующего полупроводящих лент, нам представлялось интересным определить их влияние на характеристики полупроводящих лент как для пазовой, так и для лобовой части изоляции в процессе пропитки.

Для исследований были взяты промышленные образцы лент производства ГУП ВЭИ ППЛ-1 и ППЛ-3 (ТУ 3491-022-00216415-00), ЗАО "Диэлектрик" ППЛ-1 (ТУ 3491-015-31885305-2003) и "Vonroll Isola" лента марки 215.55.

В табл.3 представлены данные по удельному поверхностному сопротивлению различных полупроводящих лент, используемых для пазовой части стержней, до и после пропитки. Пропитку вели компаундом ПК-11 по системе монолит-2. Перед пропиткой ленты кондиционировали при 120°C в течение 5 ч. Отверждение проводили по режиму 120°C – 1 ч, 150°C – 1 ч, 170°C – 5 ч. При таком режиме жели-

Таблица 3

Сравнительные характеристики низкоомных полупроводящих лент

Марка ленты, производитель	Сопротивление ленты до пропитки компаундом ПК-11, Ом	Сопротивление ленты после пропитки компаундом ПК-11, Ом
ППЛ-1 Вариант 1*	$5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$	$(5-7) \cdot 10^8$
ППЛ-1 Вариант 2*	$(2-4) \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^9$
ППЛ-1 Вариант 3*	$(5-8) \cdot 10^3$	$(3-4) \cdot 10^4$
215.55. Vonroll Isola	$(4-5) \cdot 10^2$	$(4-5) \cdot 10^3$
ППЛ-1 ЗАО Диэлектрик	$6 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$	$> 9 \cdot 10^9$

\* Вариант 1 – связующее КО; вариант 2 – связующее ЭКО; вариант 3 – связующее ЭСМ

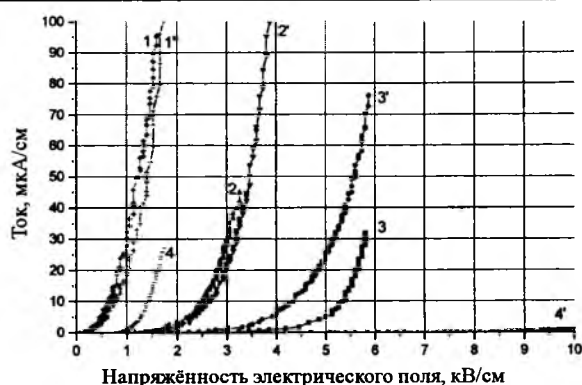


Рис. 6. Влияние пропитки компаундом ПК-11 на ВАХ полупроводящих лент ППЛ-3

рование компаунда ПК-11 наступало лишь на втором-третьем часе третьего этапа отверждения.

Как следует из этих данных, наилучшие результаты по стойкости полупроводящих лент к пропиточному компаунду ПК-11 показали образцы лент фирмы "Vonroll Isola" и вариант 3 ленты ГУП ВЭИ. Остальные образцы после пропитки компаундом и его отверждения увеличивали сопротивление много выше допустимого предела.

КО – кремнийорганическое связующее позволяет обеспечивать рабочую температуру до 180°C; ЭКО – эластифицированное кремнийорганическое связующее, на нём удаётся получить эластичные ленты с рабочей температурой 155–180°C; ЭСМ – модифицированное эпоксидное связующее, имеет рабочую температуру до 170°C, но менее эластично, чем предыдущий вариант.

На рис.6 представлены ВАХ различных вариантов полупроводящих лент марки ППЛ-3, изготовленных ГУП ВЭИ, до и после пропитки компаундом ПК-11 (к сожалению, в нашем распоряжении не было высокоомных полупроводящих лент других производителей). Отверждение проводили по указанному выше режиму.

Как следует из рис.6, пропитка практически не влияет на ВАХ лент, изготовленных на связующем ЭСМ (графики 1-3, 1'-3'), чего нельзя сказать о ленте, изготовленной на эластифицированном кремнийорганическом связующем (графики 4, 4').

Таким образом, мы можем предложить гамму полупроводящих лент, стойких к действию пропиточного компаунда ПК-11.

#### Список литературы

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. М.: НЦ ЭНАС, 2001.
2. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. М.: НЦ ЭНАС, 2002.
3. Жабко Г.П., Лыкова Т.А., Петров В.В., Федорова В.В. Полупроводящие покрытия для статорных обмоток электрических машин высокого напряжения // Электротехника. 1986. №5. С.23–26.
4. Гегенава А.Г. Свойства противокоронного покрытия статорных обмоток электрических машин высокого напряжения // Электричество. 2002. №9. С.64–66.

# Авторы опубликованных статей



**Ковалёв Виктор Дмитриевич** – генеральный директор ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, доктор техн. наук.

**Алмазов Владимир Александрович** – зам. директора ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина по спецтехнике, канд. техн. наук.



**Белкин Герман Сергеевич** – начальник отдела ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, доктор техн. наук.

**Гроздов Александр Григорьевич** – профессор РХТУ им. Д.И. Менделеева, доктор хим. наук.



**Дерменжи Пантелей Георгиевич** – начальник сектора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленино, канд. физ.-мат. наук, доктор техн. наук, старший научный сотрудник.



**Ивакин Виктор Николаевич** – зам. генерального директора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленино, канд. техн. наук.

**Коробов Олег Григорьевич** – ведущий инженер ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.

**Краячич Александр Валерьевич** – старший научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.

**Крупенин Николай Владимирович** – директор НИЦ Мид ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.

**Левицкая Евгения Игоревна** – начальник сектора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.

**Логинов Александр Гаврилович** – главный конструктор систем возбуждения ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Панибратец Анатолий Николаевич** – первый заместитель генерального директора ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, канд. техн. наук.



**Быковец Юрий Яковлевич** – старший научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.



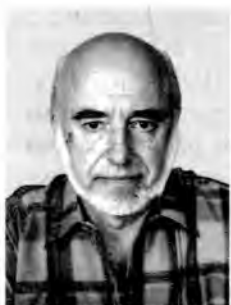
**Дробышевский Александр Александрович** – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.



**Иванов Валерий Павлович** – начальник сектора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Локтаев Юрий Михайлович** – начальник отдела ГУП ВЭИ им. В.И.Ленино, канд. техн. наук.



**Быструев Александр Константинович** – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.

**Карпинский Виктор Николаевич** – Международная межправительственная организация – "Объединенный институт ядерных исследований", лаборатория высших энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина, научно инженерный отдел электротехнологии Нуклотрона.

**Лурье Александр Иосифович** – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук, доктор электротехники, чл.-кор. АЭН РФ.

**Алфёров Дмитрий Фёдорович** – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. физ.-мат. наук.

**Валуйских Антон Олегович** – старший научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Егоров Владимир Георгиевич** – старший научный сотрудник ГУП ВЭИ



**Кондрашов Евгений Иванович** – ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Любимова Вера Андреевна** – техник-электромеханик по электрическим аппаратам ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина.



**Асина Светлана Степановна** – научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.



**Гоев Андрей Вадимович** – руководитель технической службы ОАО "МЭЛ"

**Елагин Владимир Николаевич** – ведущий инженер-конструктор ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина.

**Зенова Валентина Петровна** – старший научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.

**Кондрьчин Эдуард Владимирович** – ведущий инженер ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Люцарева Людмила Александровна** – старший научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, канд. техн. наук.

**Лядвинский Игорь Евгеньевич** – ведущий инженер ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Магницкий Андрей Андреевич** – начальник сектора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Маслов Владимир Алексеевич** – начальник лаборатории ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. хим. наук.

**Носик Лариса Петровна** – начальник сектора ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина.



**Овчаров Игорь Валентинович** – старший научный сотрудник, учёный секретарь ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.



**Остапенко Евгений Ильич** – начальник НИЦ ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.



**Панов Анатолий Алексеевич** – инженер ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина



**Перцев Алексей Александрович** – ведущий научный сотрудник отдела вакуумной коммутационной аппаратуры ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, канд. техн. наук.



**Платова Елена Сергеевна** – инженер-технолог ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина.

**Петерсон Андрей Львович** – начальник НИЦ "ТЕСТ" ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, канд. техн. наук.

**Полова Неля Александровна** – младший научный сотрудник РХТУ им. Д.И. Менделеева.



**Рыльская Лидия Александровна** – старший научный сотрудник отдела вакуумной коммутационной аппаратуры ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина, канд. техн. наук.



**Серяков Константин Иванович** – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.



**Сидоров Владимир Алексеевич** – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.

**Смирнов Анатолий Алексеевич** – старший научный сотрудник лаборатории высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина научно-инженерного отдела электро-технологии Нуклотрона международной межправительственной организации "Объединённый институт ядерных исследований, заслуженный деятель науки РФ, доктор техн. наук.

**Собакарь Тарас Владимирович** – ведущий инженер ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Ставцев Александр Валерьевич** – начальник лаборатории ЗАО "Протон-Электротекс" (г. Орёл).



**Торопчин Юрий Яковлевич** – старший научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина.



**Цфасман Григорий Матвеевич** – начальник сектора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.

**Чванов Вячеслав Алексеевич** – главный научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, доктор техн. наук, проф.



**Чемерис Владлен Семёнович** – начальник лаборатории ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.



**Черников Анатолий Александрович** – заместитель технического директора ЗАО "Протон-Электротекс" (г. Орёл).

**Фадеев Алексей Владимирович** – начальник сектора ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.

**Шульга Роберт Николаевич** – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд. техн. наук.





**Государственное унитарное предприятие  
«Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина»**

- имеет статус Государственного научного центра РФ;
- является стратегическим предприятием, утверждённым Указом Президента России;
- является ведущим предприятием России в рамках критической «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электро-энергии» (Приоритетное направление развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Энергетика и энергосбережение», утверждённое Президентом России).

**Основные направления деятельности ГУП ВЭИ в XXI веке:**

- фундаментальные и поисковые исследования;
- прикладные исследования и разработки;
- реализация инновационных проектов, в том числе инжиниринговые работы и производство наукоёмких изделий;
- испытания, диагностика и ремонт высоковольтного оборудования;
- продвижение разработок на рынок научно-технической продукции.

**Основные направления исследований в ГНЦ ВЭИ**

1. Физика высоких напряжений.
2. Теоретические и экспериментальные исследования по проблеме сверхпроводимости.
3. Влияние электромагнитных полей на материалы и оборудование.
4. Электрические процессы в твёрдых, жидких и газообразных фазах.
5. Полупроводниковые и диэлектрические материалы.
6. Физика плазмы.
7. Преобразование видов энергии.

**Перспективные технологии, развиваемые ГУП ВЭИ**

1. Технологии передачи, преобразования и распределения электрической энергии.
2. Технологии малой энергетики.
3. Технологии преобразовательной техники.
4. Технологии высоких напряжений и электроизоляция.
5. Технологии силовой полупроводниковой электроники.
6. Электротехническое оборудование с использованием технологии сверхпроводимости.
7. Технологии микропроцессорных систем управления.
8. Технологии диагностики высоковольтного оборудования.
9. СВЧ технологии.
10. Электроимпульсные технологии и системы питания.
11. Нанотехнологии.
12. Технологии водородной энергетики.
13. Технологии специальных применений.