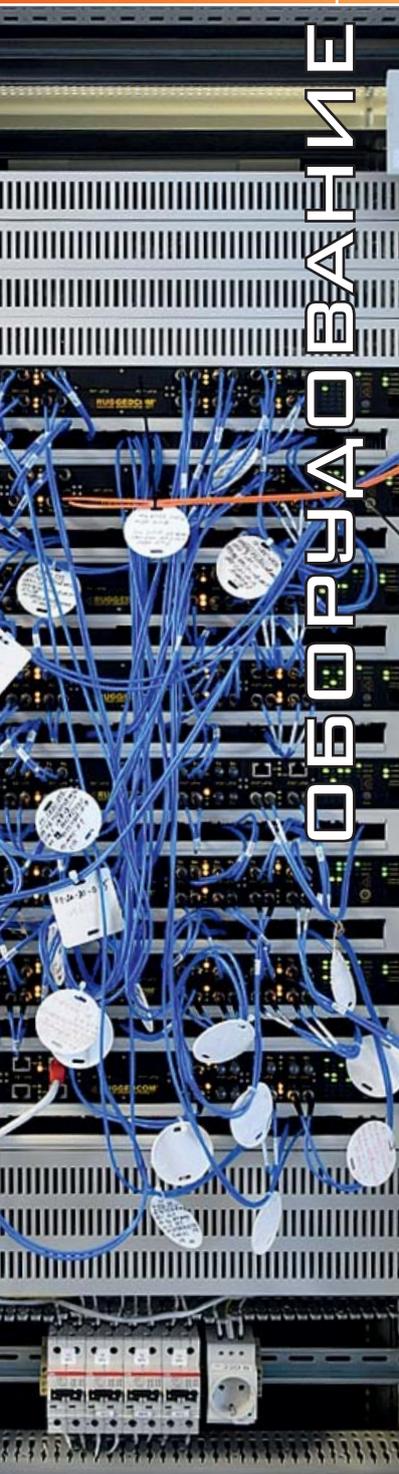


WWW.EEPiR.RU



ЖУРНАЛ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА



Использование взрывчатых веществ в быстродействующих коммутаторах высоковольтных токоограничивающих устройств

УДК 537.39:543.5

Основным элементом современного токоограничивающего устройства, предназначенного для работы на линии с напряжением до 110 кВ, является быстродействующий взрывной коммутатор, в состав которого входят различные взрывчатые вещества. В дежурном режиме взрывной коммутатор подвергается различным физическим и химическим воздействиям. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния эксплуатационных параметров (температуры, вибрации, термолиза) на взрывной коммутатор. Предложена методика и представлены результаты по оценке физической и химической стойкости различных типов взрывчатых веществ, использующихся в быстродействующих взрывных коммутаторах.

Дудин С.В.,

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных процессов в ударно-сжатых средах Института проблем химической физики РАН

Неделько В.В.,

д.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории кинетики термических превращений Института проблем химической физики РАН

Ларикова Т.С.,

научный сотрудник лаборатории кинетики термических превращений Института проблем химической физики РАН

Ключевые слова:

токоограничивающее устройство, взрывной коммутатор, физическая и химическая стойкость, термолиз

Keywords:

current-limiting device, explosive commutator, physical and chemical resistance, thermolysis

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение общего числа генерирующих станций, повышение их мощности, а также увеличение пропускной способности электрических сетей и рост плотности энергопотребления ведет к неуклонному росту токов короткого замыкания. Сохраняется уверенная тенденция такого роста, и аналитические расчеты до 2017 года показали, что в полностью замкнутой электрической сети Московской энергосистемы токи короткого замыкания возрастают до 120–150 кА. В связи с этим создание надежных токоограничивающих устройств на новых принципах работы является одной из основных проблем электроэнергетики. В Объединенном институте высоких температур (ОИВТ) РАН было предложено принципиально новое устройство глубокого ограничения токов короткого за-

мыкания на напряжение свыше 110 кВ, реализованного на основе специального реактора с быстродействующим коммутатором, использующим энергию взрыва для быстрого и надежного размыкания цепи. Детальная конструкция, логика автоматического управления и работа токоограничивающего устройства, в состав которого входит взрывной коммутатор, подробно представлены в работе [1]. Экспериментальный образец такого устройства был испытан и показал хорошие результаты для коммутации цепей свыше 110 кВ. В реальных условиях токоограничивающее устройство, в состав которого входят взрывные коммутационные элементы, должно находиться в дежурном состоянии год и сохранять свою работоспособность. С этой целью и была проведена представленная экспериментальная работа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Основным коммутационным элементом отключения является быстродействующий коммутатор взрывного типа. Разрушение проводника в таком коммутаторе производится продуктами детонации специального заряда мощного взрывчатого вещества (ВВ), находящегося внутри шины (рисунок 1).

Поскольку немаловажное значение имеет время отключения тока, работа специального заряда должна обеспечить быстрое (не более 1 мс) отключение при коротком замыкании и повышенную электрическую прочность в зоне разрыва проводника. Сечение проводника (порядка 1000 мм²), его электрические и механические свойства должны обеспечить пропускание номинального тока 2000 А, а при коротком замыкании его необходимо разорвать. С целью обеспечения быстродействия и надежности разрыва предложено использовать взрывчатые вещества с заданными детонационными свойствами. Внешний вид и экспериментальная схема коммутационного взрывного элемента представлены на рисунках 2 и 3.

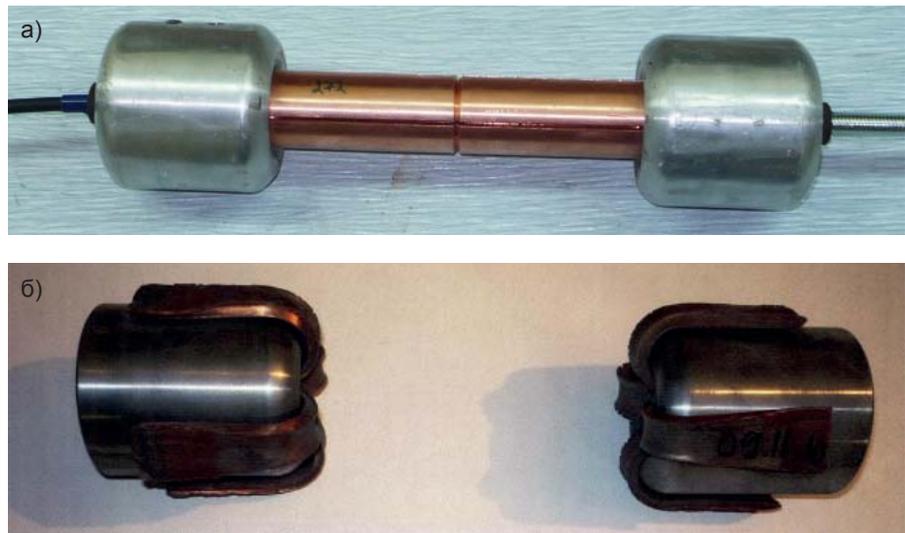


Рис. 1. Взрывной коммутационный элемент до (а) и после (б) подрыва

В дежурном режиме по шинам взрывного элемента будет протекать ток до 2 кА и на шины будет воздействовать вибрация с частотой 50 Гц. Экспериментально установлено, что в этих условиях шина может нагреваться до температуры не более 60 °С. Все элементы взрывной цепи (детонатор, разводка и основное взрывчатое вещество) будут находиться внутри шины и подвергаться тем же температурным и вибрационным воздействиям.

Кратковременное повышение токов приведет к повышению температуры токопровода, а так как он имеет достаточно большую теплоемкость и высокую

теплопроводность, то температура на поверхности контакта с ВВ может подняться очень незначительно, то есть на 1–2 °С на уровне 60 °С, что находится в пределах точности кинетических измерений и никак не приведет к заметному увеличению скорости деструкции.

Основной элемент взрывного размыкателя, содержащий ВВ, находится в прочном стеклопластиковом корпусе, который полностью предохраняет его от воздействия внешней температуры и полностью локализует продукты взрыва при его срабатывании, исключая всякое воздействие на другие устройства. Для подтвержде-



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной сборки

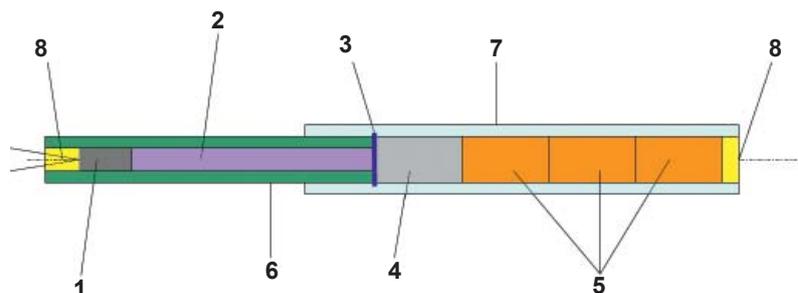


Рис. 3. Схема экспериментальной сборки (1 — электродетонатор, 2 — детонационный шнур, 3 — промежуточная вставка ВВ (пластид), 4 — блок из гексогена, 5 — блоки из продукта А-1Х-1, 6 — текстолитовая гильза, 7 — стеклянная гильза, 8 — пробки герметизирующие, изготовленные из эпоксидной смолы)

дения этого были проведены специальные испытания. Устойчивая работа ВВ гарантируется в пределах температурного диапазона от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждается паспортными данными.

Токоограничивающее устройство, представленное в работе [1], в состав которого входит быстродействующий взрывной коммутатор, управляется автоматически без участия человека и предусматривает неоднократное (три раза) отключение при КЗ. Только после этого требуется замена размыкателей. Никаких специальных условий хранения взрывного размыкателя не требуется. Его замена аналогична замене плавкого предохранителя.

Ресурсные испытания экспериментальных сборок, моделирующих внутреннюю часть для быстродействующего коммутатора взрывного типа, показали нормальную работоспособность после кратковременного воздействия (порядка 4 часов) вибраций и повышенной температуры. Результаты представлены в таблице 1.

В состав быстродействующего коммутатора взрывного типа входят следующие элементы: детонатор, разводка, основной заряд. В качестве инициатора детонации используется штатный электродетонатор. Разводка выполнена в виде детонационного шнура на основе ТЭНа или пластида, которая через пластидную вставку сопрягается с основным зарядом. Поскольку токоограничивающее устройство должно

Табл. 1. Результаты испытаний

Тип испытания	Количество экспериментов	Режимы	Результат
Контрольная партия	10	Н.у.	Все сборки сработали штатно
Вибрации	10	$F = 50\text{ Гц}$, $A = 0,5\text{ мм}$, $t = 3 \times 60\text{ мин}$	Все сборки сработали штатно
Термостатирование	5 без термочехлов, 5 с термочехлами	$T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 240\text{ мин}$	Все сборки сработали штатно

находиться в рабочем состоянии в течение года при температуре до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, то основную проблему представляет вопрос физической и химической стабильности всех детонирующих элементов быстродействующего взрывного коммутатора. Для решения этой задачи были взяты три образца взрывчатых веществ, которые могут входить в состав взрывного коммутатора:

- 1) эластит,
- 2) пластид,
- 3) детонационный шнур.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ (ТЕРМОЛИЗА) ОБРАЗЦОВ

Для оценки термической устойчивости образцов применен термогравиметрический метод измерения кинетики потери массы [2–3]. Эксперименты проведены на электронных автоматических термовесах АТВ-14-М в неизотермических условиях (линейный нагрев образцов со скоростью $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) и при постоянных температурах (изотермический метод).

Выбор данной методики с открытой реакционной системой позволяет моделировать реальные условия эксплуатации изучаемых изделий. Эксперименты проведены при относительной влажности 60% . Полагаем, что влажность окружающей среды может влиять на измеряемую скорость термолитиза из-за вклада гидролитических процессов.

Неизотермическая кинетика термолитиза

Данные по термолитизу образцов в условиях линейного нагрева представлены на рисунке 4.

Полученные кинетические кривые свидетельствуют о том, что образец № 1 менее термически стабилен по сравнению с двумя другими образцами. Заметные скорости потери массы образцом № 1 наблюдаются при температурах выше $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как образцы № 2 и № 3 устойчивы до температуры $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. В температурном диапазоне $40\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит выделение летучих примесей, количество которых находится в пределах $0,3\%$ от начальной массы образца.

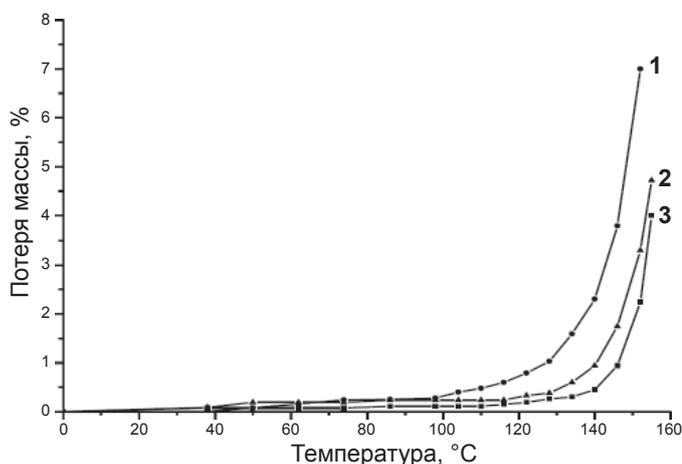


Рис. 4. Кинетика термолитиза образцов в условиях линейного нагрева на воздухе со скоростью $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (начальные массы образцов $10,0\text{--}10,2\text{ мг}$)

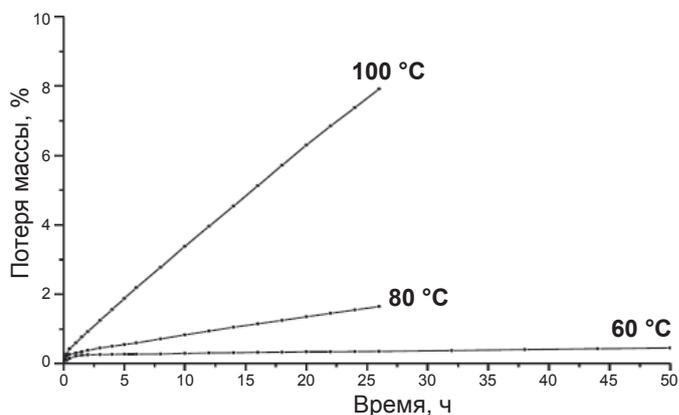


Рис. 5. Кинетика термолитиза образца № 1 на воздухе при различных температурах (начальные массы образца $98\text{--}100\text{ мг}$)

Кинетика термолиза при постоянных температурах

Поскольку практический интерес представляют низкотемпературная область термолиза и малые глубины термических превращений образцов, кинетика термолиза изучалась с применением более высоких начальных масс исследуемых образцов при сохранении максимально чувствительной шкалы прибора. В этом случае погрешность измерения выбранного кинетического параметра не превышает 5%.

Образец № 1 (эластим)

На рисунке 5 показаны кинетические кривые потери массы образцом № 1 при различных температурах.

В работе употребляется термин «термолиз», поскольку процесс потери массы образцами может включать выход летучих при заданной температуре примесей и отдельных компонентов образца, химические взаимодействия между компонентами и их собственное термическое разложение. Скорости термолиза на линейных участках кинетических кривых для образца № 1 представлены в таблице 2.

Как и в неизотермических экспериментах наблюдается начальная стадия выхода летучих примесей из образца, содержание которых не превышает 0,3 масс.%. Эффективная энергия активации, характеризующая зависимость скорости термолиза от температуры, равна 26 960 кал/моль ($\approx 125\,500$ Дж/моль). Процесс

Табл. 2. Скорости потери массы образцами № 1, 2 и 3 в процессе термолиза на воздухе в открытой реакционной системе (термогравиметрия) при различных температурах

Температура, °С	Скорость потери массы, %/ч		
	Образец №1	Образец №2	Образец №3
60	0,008	0,001	0,001
80	0,078	0,017	0,007
100	0,610	0,150	0,040

подчиняется уравнению Аррениуса:

$$V = 10^{15,42} \cdot \exp[-26\,960/RT] \text{ (%/ч)},$$

в котором $R = 1,987$ кал/(моль·К).

На основе полученных активационных параметров термолиза выведено уравнение, связывающее скорость и температуру термолиза:

$$\lg V \text{ (%/ч)} = 15,42 - 5834 / T,$$

где T — температура термолиза в градусах Кельвина.

Время термолиза, соответствующее потере образцом 1% массы при 60 °С, $\tau_{1\%}$, составляет 125 ч ($\approx 5,2$ суток).

Образец № 2 (пластид)

На рисунке 6 показаны кинетические кривые термолиза образца № 2 при различных температурах на воздухе. В таблице 2 представлены скорости термолиза образца № 2 на воздухе при различных температурах, измеренные на линейных участках кинетических кривых.

Эффективная энергия активации, характеризующая зависимость скорости термолиза образца № 2 от температуры, равна 31 800 кал/моль

($\approx 125\,500$ Дж/моль). Рост абсолютной величины энергии активации термолиза свидетельствует о более высоком температурном коэффициенте термолиза образца 2 и его большей термостойкости по сравнению с образцом № 1.

Процесс подчиняется уравнению Аррениуса:

$$V = 10^{17,62} \cdot \exp[-31\,800/RT] \text{ (%/ч)},$$

в котором $R = 1,987$ кал/(моль·К).

В упрощенном виде уравнение, связывающее скорость и температуру термолиза, имеет вид:

$$\lg V \text{ (%/ч)} = 17,62 - 6880 / T,$$

где T — температура термолиза в градусах Кельвина.

$\tau_{1\%}$ при 60 °С составляет 1000 ч ($\approx 41,6$ суток).

Образец № 3 (детонационный шнур)

На рисунке 7 показаны кинетические кривые термолиза образца № 3 при различных температурах на воздухе. В таблице 2 приведены значения скоростей термолиза образца № 3 на воздухе, измеренные на линейных участках кинетических кривых.

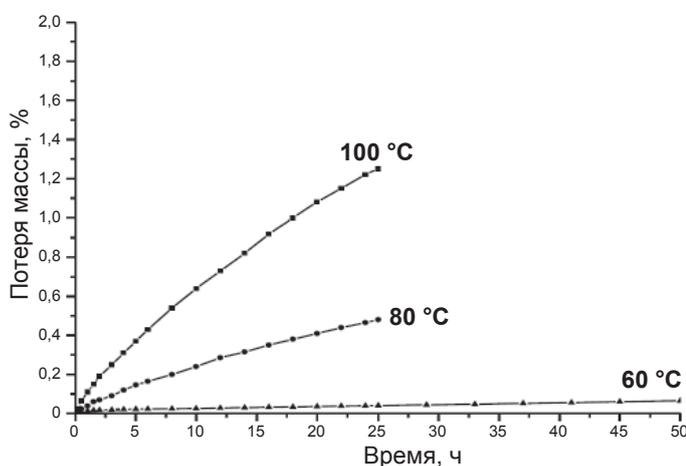


Рис. 6. Кинетика термолиза образца № 2 на воздухе при различных температурах (начальные массы образца 170–180 мг)

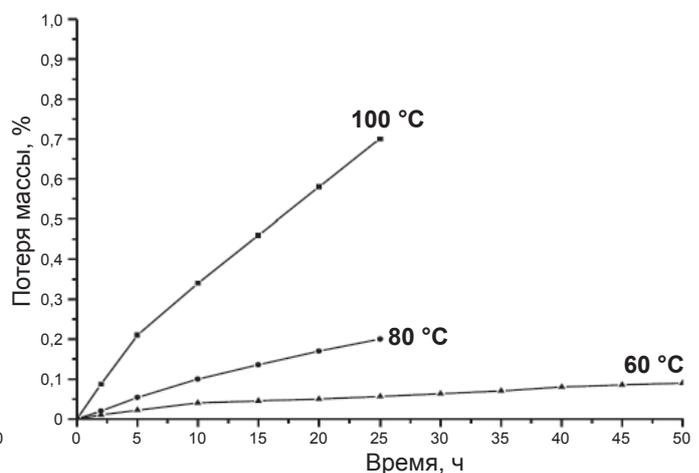


Рис. 7. Кинетика термолиза образца № 3 на воздухе при различных температурах (начальные массы образца 170–180 мг)

Эффективная энергия активации термоллиза равна 22 850 кал/моль ($\approx 95\,510$ Дж/моль). Интересен тот факт, что образцы № 2 и 3 имеют практически одинаковые скорости термоллиза при 60 °С, однако в случае последнего процесс протекает с более низким энергетическим барьером, о чем свидетельствует более низкая величина эффективной энергии активации.

Процесс подчиняется уравнению Аррениуса:

$$V = 10^{12,03} \cdot \exp[-22850 / RT] \text{ (%/ч)},$$

в котором $R = 1,987$ кал/(моль·К).

В упрощенном виде уравнение, связывающее скорость и температуру термоллиза, имеет вид:

$$\lg V \text{ (%/ч)} = 12,03 - 5000 / T,$$

где T — температура термоллиза в градусах Кельвина.

$\tau_{1\%}$ при 60 °С составляет 1000 ч ($\approx 41,6$ суток).

Данные эксперимента свидетельствуют о том, что при температурах, превышающих 60 °С, скорости термоллиза образца № 2 должны быть выше, чем у образца № 3 (что подтверждается полученными данными). При температу-

рах ниже 60 °С скорости термоллиза образца № 2 будут заметно ниже, чем для образца № 3.

На основании кинетических закономерностей термической устойчивости исследуемых образцов можно сделать вывод, что образцы № 2 и № 3 — достаточно стойкие к условиям повышенной температуры, а образец № 1 — менее стойкий. Экспериментальное моделирование условий длительной работы устройства, куда входят образцы, производится путем выбора температуры и времени выдержки, которые будут соответствовать условиям реального применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены испытания экспериментальных сборок, моделирующих работу быстродействующего взрывного коммутатора в условиях дежурного режима работы высоковольтного токоограничивающего устройства, которые показали нормальную работоспособность при воздействии физических факторов, таких как повышенная температура и вибрация.

Представлена методика, определяющая физическую и химическую стойкость различного типа взрывчатых веществ, используемых в быстродействующих взрывных коммутаторах при их работе в дежурном режиме. Эта методика позволяет оценить работоспособность образцов, находящихся в реальных условиях эксплуатации токоограничивающего устройства в течение времени дежурного режима (примерно один год). Вероятно, что будут разрабатываться новые материалы и взрывчатые вещества, которые могут более эффективно использоваться в данных устройствах. Но проблема их физической и химической стойкости будет оставаться. И поэтому для новых материалов, которые будут применяться в быстродействующих взрывных коммутаторах, проектируемых высоковольтных токоограничивающих устройств, необходимо оценивать физическую и химическую стойкость по предлагаемой методике, которая прогнозирует поведение новых материалов в конкретных условиях эксплуатации. 

ЛИТЕРАТУРА

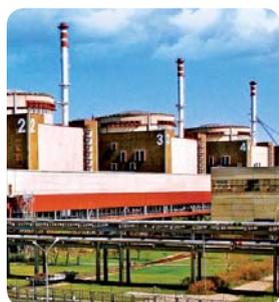
1. Шурупов А.В., Козлов А.В., Фортвов В.Е., Бердников Р.Н., Шакарян Ю.Г., Сон Э.Е. Токоограничители на основе быстродействующих коммутаторов. Опыт создания токоограничивающего устройства на напряжение 220 кВ // Энергия единой сети, 2013, № 2(7). С. 54–65.
2. Гальперин Л.Н., Колесов Ю.Р., Зеленов Н.А. Автоматические весы с магнитоэлектрическим компенсатором веса // Измерительная техника, 1971, № 4. С. 23–25.
3. Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978.

REFERENCES

1. Shurupov A.V., Kozlov A.V., Fortov V.E., Berdnikov R.N., Shakaryan Yu.G., Son E.E. Current limiters based on high-speed switches. The experience of creating a current-limiting device for 220 kV // Energy of a unified network, 2013, No. 2 (7). Pp. 54–65.
2. Galperin L.N., Kolesov Yu.R., Zelenov N.A. Automatic balance with a magnetolectric weight compensator // Measuring Technique, 1971, No. 4. Pp. 23–25.
3. Wendland W. Thermal methods of analysis. M.: Mir, 1978.

Издательство журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение»
выпустило книгу академика РАЕН, профессора В. А. НЕПОМНЯЩЕГО

«НАДЕЖНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ»



В монографии исследована надежность оборудования электростанций и электрических сетей напряжением 1150–10(6) кВ, разработана методика сбора и статистической обработки информации о надежности оборудования. На основе статистических данных и расчетов определены основные параметры надежности и динамика их изменения в процессе эксплуатации. Выявлены статистические законы распределения отказов и времени восстановления элементов энергосистем. Проведено их сравнение с зарубежными данными.



Тираж книги 5000 экз., объем 196 с., формат 170x235 мм. По вопросам приобретения издания обращайтесь по многоканальному телефону +7 (495) 645-12-41 или по e-mail: info@eeper.ru