





ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издается 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.**

БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П.,

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., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н.

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

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи по объединенному 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.

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

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника» обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности несет.

Рукописи статей не возвращаются.

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

Адрес редакции: Москва, Красноказарменная ул., 12, ВЭИ. Телефон/факс: 361-95-96

E-mail elektrotehnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина.

Научный редактор Л.А. Романова.

Редактор Т.В. Штанько.

Сдано в набор 18.08.2003. Подписано в печать 09.10.2003. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 97

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

№ 11 НОЯБРЬ 2003

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

| | |
|---|----|
| Бурман А.П., Савваитов Д.С. Состояние высоковольтного оборудования в Единой национальной электрической сети | 2 |
| Белкин Г.С., Вариводов В.Н. Перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения | 5 |
| Белкин Г.С. Адаптивные методы определения коммутационных характеристик выключателей | 12 |
| Берлин Б.Е., Вишневский Ю.И., Пельц А.С., Тонконогов Е.Н., Ярмаркин М.К. Оптимизация дугогасительных устройств высокого напряжения в режиме коммутации емкостных токов.... | 18 |
| Бабкин И.В., Берлин Б.Е., Вишневский Ю.И., Лопаев В.Н., Третьяков С.В. Комплектные распредел устройства с элегазовой изоляцией на сверхвысокие напряжения | 23 |
| Егоров В.Г., Колобанова Н.Н., Торопчин Ю.В., Чемерис В.С. Разработка элегазовых выключателей для КРУЭ на 170 и 362 кВ | 28 |
| Зорин Л.М., Подъячев В.Н., Шлейфман И.Л. Генераторные выключатели в цепи мощных энергоблоков и требования, предъявляемые к ним .. | 34 |
| Перцев А.А., Белкин Г.С., Рыльская Л.А. Коммутационные процессы в вакуумных выключателях с параллельным соединением дугогасительных камер | 39 |
| Легостов В.В., Дорошев К.И. Комплектные устройства ОАО "Мосэлектрощит" | 46 |
| Алфёров Д.Ф., Будовский А.И., Иванов В.П., Иванов Ю.В., Сидоров В.А. Однофазные вакуумные контакторы постоянного и переменного тока..... | 51 |
| Алфёров Д.Ф., Будовский А.И., Иванов В.П., Сидоров В.А. Сильноточный быстродействующий короткозамыкатель | 56 |
| Алфёров Д.Ф., Матвеев Н.В., Сидоров В.А., Хабаров Д.А. Высоковольтное быстродействующее шунтирующее устройство | 60 |
| Юрий Алексеевич Сабинин | 65 |

HIGH-VOLTAGE TECHNICS

| | |
|---|----|
| Burman A.P., Savvaitolov D.S. Present state of high-voltage equipment in United National Electrical System (UNES) | 2 |
| Belkin G.S., Varevodov V.N. Future trends of high-voltage commutation apparatus development | 5 |
| Belkin G.S. Adaptive determination methods of circuit breakers commutation characteristics | 12 |
| Berlin B.E., Vishnevsky Y.I., Pelts A.S., Tonkonogov E.N., Yarmarkin M.K. Optimization of high-voltage arc chute apparatus on condition of capacitor load currents commutation | 18 |
| Babkin I.V., Berlin B.E., Vishnevsky Y.I., Lopaev V.N., Tretiyakov S.V. Complete control systems with SF6 insulation of high-speed voltage | 23 |
| Egorov B.G., Kolobanova N.N., Toropchin Y.V., Chemeris V.S. Development of SF6 circuit breakers for complete control systems in 170 and 362 kV electric networks..... | 28 |
| Zorin L.M., Podyachev V.N., Toropchin Y.V., Chemeris V.S. Generator circuit breakers in high-power installations and requirements to them | 34 |
| Pertsev A.A., Belkin G.S., Rilskaya L.A. Commutation processes in vacuum circuit breakers with parallel arc chutes | 39 |
| Legostov V.V., Doroshev K.I. Complete control systems manufactured by PJSC "Moselectroschit" .. | 46 |
| Alferov D.F., Budovsky A.I., Ivanov V.P., Ivanov Y.V., Sidorov V.A. AC and DC single-phase vacuum contactors | 51 |
| Alferov D.F., Budovsky A.I., Ivanov V.P., Ivanov Y.V., Sidorov V.A. High-current fast-acting shorting device | 56 |
| Alferov D.F., Matveev N.V., Sidorov V.A., Habarov D.A. High-voltage fast-acting shunt system | 60 |
| Yuriy Alekseevich Sabinin | 65 |

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

Состояние высоковольтного оборудования в Единой национальной электрической сети

БУРМАН А.П., главный эксперт Председателя Правления РАО "ЕЭС России", проф.,
САВВАИТОВ Д.С., исполнительный директор ОАО ВНИИЭ, канд. техн. наук

Электрические аппараты и электрооборудование высокого напряжения используются в электроэнергетических системах для формирования необходимых схем передачи энергии от ее источника к потребителю как в нормальных эксплуатационных режимах, так и в аварийных условиях и для обеспечения непрерывного контроля за состоянием систем высокого напряжения, ограничения возникающих перенапряжений и токов КЗ в процессе эксплуатации. В статье приведены основные данные по состоянию электрооборудования электрических сетей 110–750 кВ, которое подразделяется в соответствии с функциональными признаками: коммутационные аппараты (выключатели и разъединители), измерительные аппараты (трансформаторы тока и напряжения) и комплектные распределительные устройства (КРУЭ). Даны предложения по замене в процессе технического перевооружения морально устаревшего оборудования на современное.

Высоковольтные выключатели 110–750 кВ

В Единой национальной электрической сети эксплуатируется около 30000 выключателей классов напряжения от 110 до 750 кВ. Распределение по классам напряжения: 110 кВ – 80,5%, 220 кВ – 15,2%, 330 кВ – 1,2%, 500 кВ – 3%, 750 кВ – 0,1%.

Большую часть выключателей составляют масляные баковые выключатели с номинальным напряжением 110 и 220 кВ. Среди выключателей 110 кВ масляные баковые выключатели составляют 58%, среди выключателей 220 кВ – 45%. Масляные баковые выключатели серий МКП и У в больших количествах поставлялись в энергосистемы страны с 30- до 80-х годов заводом "Уралэлектроаппарат", позже ПО "Уралэлектротяжмаш" (УЭТМ).

Маломасляные выключатели 110 и 220 кВ составляют 23% общего количества установленных выключателей (среди выключателей 110 кВ – 27%, среди выключателей 220 кВ – 17%). Это

выключатели типов ВМТ-110 и ВМТ-220 производства УЭТМ, выключатели ММО-110 болгарского производства, небольшое количество выключателей фирмы ASEA и других фирм. Выпуск и поставка выключателей ВМТ-110 и ВМТ-220 продолжается в настоящее время. В 2000 г. поставлено 285 выключателей ВМТ-110 и 15 выключателей ВМТ-220, в 2001 г. – 320 выключателей ВМТ-110 и 30 выключателей ВМТ-220.

Воздушные выключатели эксплуатируются в распределительных устройствах всех классов напряжения. Их количество составляет 18,6% общего числа выключателей, среди выключателей 110 кВ – 12%, 220 кВ – 35%, 330 и 500 кВ – 97%.

Воздушные выключатели серий ВВН, ВВ, ВВБ, ВВД, ВНВ и др. выпускались предприятиями "Электроаппарат" и "Уралэлектротяжмаш".

До 1996 г. в энергосистемах имелись единичные образцы элегазовых выключателей, которые можно было рассматривать как находящиеся в опытной эксплуатации. В 1997 г. было выпущено Решение Департамента электрических сетей № Э-1/97 "О преимущественном применении элегазовых выключателей при строительстве, реконструкции, техническом перевооружении и замене оборудования подстанций 330–750 кВ РАО "ЕЭС России". За прошедшее после этого решения время количество элегазовых выключателей в распределительных устройствах всех напряжений постоянно увеличивалось и в настоящее время составляет около 3%. Элегазовые колонковые и баковые выключатели поставляются УЭТМ (преимущественно 110 кВ с токами отключения до 40 кА), а также ведущими зарубежными фирмами АББ, "Альстом", "Сименс"; небольшое количество баковых выключателей 110 и 220 кВ поставлено ОАО "Энергомеханический завод".

Значительная часть масляных и воздушных выключателей, эксплуатируемых в Единой на-

циональной электрической сети, прежде всего напряжением 110 и 220 кВ, отработала установленный нормативными документами срок службы. К настоящему времени число таких выключателей составляет около 40%. Отработали свой нормативный ресурс 90% выключателей МКП-110, 40% выключателей У-110, 30% выключателей ВВН-110, 40% выключателей ВВН-220.

Сверхнормативный срок службы, применение выключателей в ненормированных для них условиях, дефекты конструкции и низкое качество изготовления приводят к низкой надежности выключателей в работе и высокой повреждаемости.

Основные причины повреждаемости выключателей:

- недостатки конструкции;
- дефекты, обусловленные низким качеством материалов;
- дефекты изготовления;
- нарушения нормативных и директивных документов по ремонту и эксплуатации;
- установка в цепях шунтирующих реакторов и конденсаторных батарей, для коммутации которых выключатели не предназначены;
- установка в цепях, где токи КЗ и восстановливающиеся напряжения превышают нормированные параметры выключателя.

К 2005 г. должны быть заменены 35% установленных сейчас выключателей, а к 2015 г. – 55%.

Программа технического перевооружения и реконструкции Единой национальной электрической сети предусматривает замену выключателей, отработавших свой ресурс. Прежде всего должна производиться замена воздушных и масляных выключателей серий: ВВН, ВВ, У, МКП, ММО. В первую очередь при замене должны использоваться элегазовые выключатели, имеющие высокую надежность, высокий механический и коммутационный ресурс, обеспечивающие надежную коммутацию индуктивных и емкостных нагрузок, позволяющие организовать их эксплуатацию при минимальных эксплуатационных издержках без воздухоприготовительных установок и маслохозяйств. При этом надо использовать новые отечественные разработки колонковых и баковых элегазовых выключателей типов ВГТ-110, ВГК-220, ВГБ-110 и др., а так же выключатели ведущих зарубежных фирм. По данным СИГРЭ в зарубежных сетях парк элегазовых выключателей составляет в различ-

ных классах напряжения: 110 кВ – 52%, 220 кВ – 55%, 330 кВ – 69%, 500 кВ – 66%, 750 кВ – 92%. При этом среди выключателей, установленных за последние 10 лет, доля элегазовых выключателей составляет 93%.

Разъединители 110–750 кВ

В Единой национальной электрической сети эксплуатируется около 120000 разъединителей классов напряжения от 110 до 750 кВ. Распределение по классам напряжения: 110 кВ – 84,5%, 220 кВ – 15,2%, 330–750 кВ – 0,3%.

Надежность работы отечественных разъединителей невысока.

Основные причины отказов разъединителей:

- низкое качество фарфоровых опорных изоляторов;
- недостаточная надежность контактов;
- несовершенная конструкция и низкое качество изготовления деталей и узлов кинематической передачи;
- несовершенная конструкция и низкое качество переключающих устройств электромагнитных блокировок;
- отсутствие постоянного подогрева шкафов управления и как следствие конденсация в них влаги;
- несовершенная конструкция и низкое качество переключающих блок-контактов КСА.

До 25% отказов разъединителей связано с ошибочными действиями оперативного и ремонтного персонала.

При техническом перевооружении рекомендуется замена разъединителей 110–750 кВ на новые, более совершенные, в том числе на разъединители серии РГ (РГН) напряжением 110–220 кВ и другие разъединители, выпускаемые совместными предприятиями в России и ведущих зарубежных фирм.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Количество измерительных трансформаторов 110–750 кВ, установленных в энергосистемах, примерно на порядок превосходит количество крупных силовых трансформаторов. Ориентировочно количество измерительных трансформаторов тока, установленных на подстанциях России, составляет около 110000, в том числе на напряжение 110, 150 кВ – 82030, на 220 кВ – 18150, на 330 кВ – 2830, на 400, 500, 750 кВ – 6700, а трансформаторов напряжения – около 90000, в том числе на напряжение 110,

150 кВ – 69050, на 220 кВ – 15000, на 330 кВ – 1600, на 500 кВ – 4000, на 750 кВ – 200.

Срок службы измерительных трансформаторов, установленных на подстанциях России, примерно соответствует срокам службы силового оборудования. Так, на подстанциях МЭС Центра и МЭС Волги сроки службы более половины измерительных трансформаторов превосходят 20 лет. В некоторых энергосистемах положение еще сложнее, например, в Челябэнерго более 85% измерительных трансформаторов имеют срок службы 30 лет и более.

Трансформаторы тока типа ТФЗМ 110–500 кВ и трансформаторы напряжения типа НКФ 110–500 кВ имеют существенный изъян – недостаточную защиту от атмосферной влаги. Это приводит к тому, что через 10–15 лет у трансформаторов напряжения и через 20–25 лет у трансформаторов тока влажность твердой изоляции достигает опасных значений (4–6%).

В отличие от трансформаторов тока у трансформаторов напряжения частичные периодически повторяющиеся микроразряды при увлажнении возникают во всем объеме изоляции. Это приводит к замыканию части витков обмотки высокого напряжения и повышению напряжения на вторичной стороне. Трансформаторы напряжения, забракованные по показателям увлажнения изоляции или повышения напряжения на вторичной стороне, подлежат замене. Восстановление их невозможно.

Созданные в конце 80-х годов измерительные трансформаторы тока типа ТФНКД и ТФРМ с изоляцией конденсаторного типа оказались одними из самых ненадежных электрических аппаратов. Использование их на особо ответственных объектах нежелательно.

Необходимо провести модернизацию защиты от увлажнения изоляции трансформаторов тока ТФЗМ 110–500 кВ и трансформаторов напряжения НКФ 110–500 кВ путем введения масляного затвора. При защите ее от увлажнения ресурс самой твердой изоляции трансформаторов тока ТФЗМ 110–500 кВ даже после работы его в течение 25–30 лет остается достаточно большим.

В настоящее время Раменским электротехническим заводом выпускаются антрезонансные индуктивные трансформаторы напряжения серии НАМИ 110–220–330 кВ, имеющие по сравнению с емкостными трансформаторами напряжения лучшую стабильность в наивысших классах точности, меньшие погрешности в переходных процессах, большую нагрузочную способ-

ность и более выгодное соотношение стоимость/качество. Однако с ростом номинального напряжения конструкция трансформаторов серии НАМИ сильно усложняется, растет число ступеней в каскаде и становится трудно обеспечить необходимую мощность в требуемых классах точности. Поэтому серия антрезонансных трансформаторов напряжения НАМИ ограничивается классом напряжения 330 кВ включительно.

Нелинейные ограничители перенапряжения (ОПН)

Важнейшим элементом для обеспечения надежности работы изоляции электрических сетей является совершенствование системы защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений на основе широкого внедрения ограничителей перенапряжения.

В настоящее время в большинстве энергосистем срок эксплуатации вентильных разрядников превышает нормированный для них срок службы. Вентильные разрядники заменяются на ОПН, которые имеют лучшие защитные характеристики, что позволяет снизить воздействие перенапряжений на основное электрооборудование и тем самым продлить срок его службы и повысить надежность его работы.

Многообразие выпускаемых защитных аппаратов по их характеристикам и стоимости позволяет выбрать наиболее подходящий для потребителя аппарат в зависимости от параметров сети, назначения и места установки ОПН.

Выбор основных параметров ограничителей перенапряжений должен осуществляться в соответствии с "Методическими указаниями по применению ограничителей перенапряжений в электрических сетях 110–750 кВ", разработанными ВНИИЭ совместно с ЭСП.

В настоящее время рекомендуется применение одноколонковых ограничителей, базирующихся на варисторах, не изменяющих свои характеристики в процессе эксплуатации, что позволяет исключить их эксплуатационный контроль. Пропускная способность ограничителей должна быть достаточной, чтобы обеспечить надежную работу в нормальных и аварийных режимах и ограничить грозовые и коммутационные перенапряжения до требуемого уровня.

Комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ)

В последнее время в отечественной и мировой практике конкретизировались области при-

менения КРУЭ: крупные города с большой плотностью застройки, труднодоступные районы, районы с сильно загрязненной атмосферой, районы с повышенной сейсмичностью и с суровыми климатическими условиями.

В Единой национальной электрической сети КРУЭ эксплуатируются с 1979 г., когда в Мосэнерго были введены две подстанции 220/110 кВ: Елоховская (с КРУЭ отечественного производства) и Свиблово (с импортным оборудованием фирмы BBC).

С тех пор в эксплуатацию введено более 266 ячеек КРУЭ 110 и 220 кВ, в том числе 110 кВ – 228, 220 кВ – 38. Большая часть из них (около 90%) выпущена ПО "Электроаппарат" и выделившимся из этого объединения ОАО "Энергомеханический завод". Около 10% ячеек поставлено предприятиями компании АББ.

Около 80% ячеек эксплуатируется в Мосэнерго, остальные – в Ленэнерго, Тюменьэнерго, Свердловэнерго, Комиэнерго.

Для сопоставления уровня применения КРУЭ в России и за рубежом укажем, что только предприятиями компании АББ поставлено в 75 стран мира около 9000 ячеек КРУЭ, из них около 200 ячеек на напряжение 550 кВ.

Ближайшими задачами в части внедрения

КРУЭ являются:

- устранение недостатков, выявленных при эксплуатации отечественных КРУЭ;
- расширение районов применения КРУЭ, в первую очередь применение КРУЭ в районах с суровыми климатическими условиями и высокой сейсмичностью;
- внедрение современного газотехнологического и испытательного оборудования; для повышения уровня эксплуатации КРУЭ, сокращения затрат и повреждаемости следует внедрять ряд современных автоматизированных систем диагностики и управления.

Выводы

Представленные материалы показывают необходимость качественного изменения состава аппаратов и оборудования высокого напряжения, находящегося в настоящее время в эксплуатации. Установленное в свое время высоковольтное оборудование морально устарело и в большей части выработало (или выработает в ближайшие годы) свой нормативный ресурс. Все это потребует привлечения необходимых инвестиций в высоковольтные линии электропередачи и замену в них оборудования на изделия отвечающие современному техническому уровню.

Перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения

БЕЛКИН Г.С., ВАРИВОДОВ В.Н.

Рассмотрены перспективы развития коммутационной аппаратуры, пути совершенствования аппаратов и принципиально новые решения. Показаны преимущества и области применения современных видов коммутационной аппаратуры. Обсуждены проблемы, связанные с существованием в эксплуатации большого количества выключателей, устаревших морально и физически.

С начала 80-х годов прошедшего века произошел качественный скачок в технологии выпускаемых высоковольтных коммутационных аппаратов: на смену масляным и воздушным выключателям пришли аппараты с использованием в качестве изоляционной и дугогасительной среды вакуума или газообразной шестифтористой серы – элегаза. Распределение выключателей среднего напряжения по типам на мировом рынке в 1975–1990 гг. представлено на рис.1.

Что касается выключателей высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения (от 110

до 1150 кВ), то элегазовые выключатели в технически развитых странах практически вытеснили все другие типы аппаратов (рис.2).

Следует отметить, что существуют две крупные проблемы, связанные с развитием коммутационной аппаратуры высокого напряжения, – создание новых более совершенных конструкций и определение судьбы находящихся длительное время в эксплуатации (и часто устаревших) аппаратов.

Решением этих проблем и определяется уровень современного мирового и отечественного коммутационного оборудования.

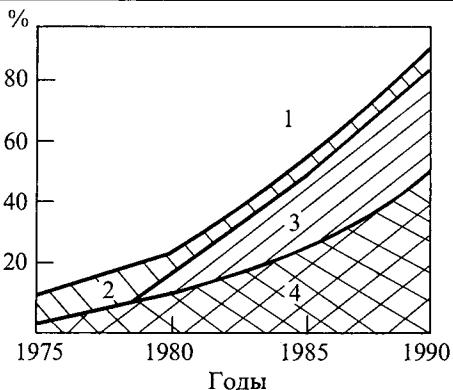


Рис.1. Тенденции спроса на высоковольтные выключатели 6–35 кВ различного типа на мировом рынке:

1 – масляные; 2 – воздушные; 3 – элегазовые;
4 – вакуумные

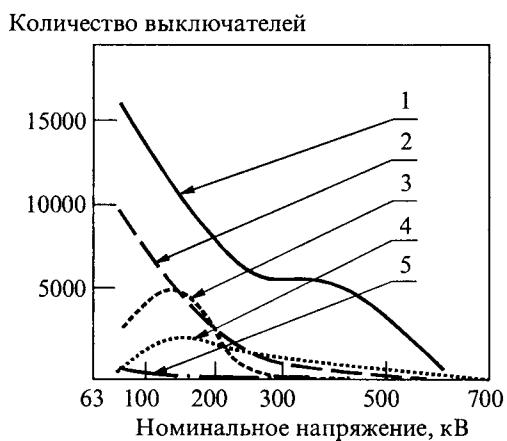


Рис.2. Распределение выключателей, находящихся в эксплуатации, по типам и номинальному напряжению (по данным СИГРЭ):

1 – элегазовые; 2 – маломасляные; 3 – баковые масляные; 4 – воздушные; 5 – вакуумные

Интенсивное внедрение вакуумной и элегазовой аппаратуры обусловлено тем, что пока не найдено способов эффективного дугогашения, способных конкурировать с дугогашением в элегазе или вакууме. Не получено новых видов диэлектриков, по совокупности своих электроизоляционных, дугогасительных и эксплуатационных свойств превосходящих элегаз или вакуум.

Основные достоинства элегазового оборудования определяются уникальными физико-химическими свойствами элегаза: при атмосферном давлении электрическая прочность элегаза в 3 раза выше, чем у воздуха, а при давлении элегаза 0,3–0,4 МПа его электрическая прочность выше, чем у трансформаторного масла; отключающая способность элегазовых коммутационных аппаратов при одинаковых условиях на 2 порядка выше, чем у воздушных выключателей.

Элегазовому оборудованию также присущи:

- компактность;
- большие межревизионные сроки, вплоть до отсутствия эксплуатационного обслуживания в течение всего срока службы;
- широкий диапазон номинальных напряжений (от 6 кВ до 1150 кВ);
- пожаробезопасность и повышенная безопасность обслуживания.

Вакуумные аппараты характеризуются максимальными значениями электрической прочности промежутков (при их длинах до 10–15 мм), максимальной скоростью восстановления электрической прочности при отключении токов, минимальными массой подвижных частей и энергией привода, минимальными габаритами и массой аппарата в целом, максимальным ресурсом.

Сейчас за рубежом ведущие фирмы практически полностью перешли на выпуск комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ) и элегазовых выключателей для открытых распределительных устройств (ОРУ) на классы напряжения 110 кВ и выше, а также вакуумных выключателей на напряжение 6–35 кВ (с некоторой долей элегазовых выключателей и КРУЭ).

Применение на средние классы напряжения элегазовой или вакуумной аппаратуры определяется как историческими условиями создания технологических баз, так и технико-экономическими показателями при производстве и эксплуатации. Каждый вид оборудования обладает своими преимуществами. Если вакуумные аппараты требуют менее мощные приводы и имеют, как правило, более высокий коммутационный ресурс, то элегазовые выключатели при коммутациях создают меньшие перенапряжения и, соответственно, облегчают работу изоляции другого энергетического оборудования.

Для снижения перенапряжения из-за среза тока при его отключении в вакуумных выключателях иногда применяются специальные ограничители перенапряжений.

Элегазовому оборудованию среднего напряжения традиционно отдают предпочтение во Франции, Италии, странах Скандинавии, Испании, а вакуумному – в Германии, Великобритании, Японии.

При выборе элегазовой или вакуумной аппаратуры решающее значение могут иметь условия, в которых работают аппараты. Например, элегазовые аппараты предпочтительнее при использовании в цепях электродвигателей ограниченной мощности при сравнительно небольших

длинах соединительных кабелей, в качестве выключателей нагрузки (в том числе в составе КРУЭ). Вакуумные выключатели особенно эффективны там, где необходимы частые коммутации и большой ресурс.

В целом можно считать, что доля элегазового оборудования на средние классы напряжения на мировом рынке устойчиво составляет 20–30% всего числа требуемых коммутационных аппаратов.

Кроме ограничения области применения вакуумных выключателей по номинальному напряжению других серьезных причин ограничений нет.

В области больших номинальных и отключаемых токов известны решения, при которых применяются как элегазовые, так и вакуумные дугогасительные устройства. Например, фирма ABB разработала и поставляет элегазовые генераторные выключатели. Фирмой "Сименс" разработаны вакуумные генераторные выключатели с номинальными токами отключения до 80 кА. Задача пропускания больших номинальных токов в вакуумных генераторных выключателях решается путем параллельного соединения нескольких вакуумных дугогасительных камер в каждом полюсе.

Все фирмы, работающие в области коммутационной аппаратуры, периодически обновляют номенклатуру своих изделий, разрабатывают аппараты новых поколений с целью повышения их надежности и ресурса, уменьшения габаритов и материалоемкости.

Ресурс лучших вакуумных выключателей достигает в настоящее время 40000–50000 операций при коммутации номинального тока и 100 операций при коммутации номинального тока отключения. При этом габариты и материалоемкость аппаратов уменьшаются при сохранении основных параметров и повышении надежности. Это можно проиллюстрировать графиком изменения диаметра и массы самой распространенной вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) на напряжение 10 кВ с током отключения 20 кА разработки ВЭИ им. В.И.Ленина (рис.3). В результате совершенствования конструкции контактной системы удалось уменьшить диаметр камеры в 2,5 раза, а массу в 3 раза. ВДК 4-го поколения по своим характеристикам соответствует лучшим зарубежным образцам.

Уровень разработок элегазового оборудования в России также приближается к лучшим мировым образцам – особенно работ, выполненных в рамках международных проектов (ВЭИ –

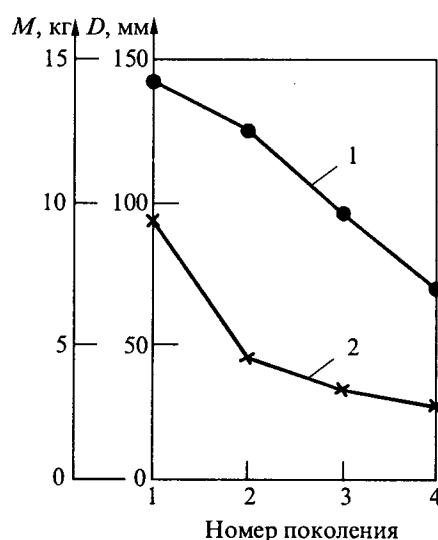


Рис.3. Диаметр (1) и масса (2) ВДК (на напряжение 10 кВ с током отключения 20 кА) различных поколений

Корейский электротехнологический институт (Южная Корея), ВЭИ – "Кромптон Гревз" (Индия), НИИВА – "Хендэ" (Южная Корея), ВЭИ – "Самсунг" (Южная Корея), что обусловлено хорошим научным потенциалом, сформировавшимся еще в 60–70-х годах, позволившим благодаря длительному опыту работы в области элегазовой аппаратуры создавать современное коммутационное оборудование.

В тоже время в Российской Федерации по-прежнему существует отставание в освоении производства элегазовой аппаратуры по сравнению с ведущими странами, вызванное, прежде всего, общим спадом производства и отсутствием значительного развития энергосистем за прошедшие 20 лет. Поэтому важнейшими задачами развития элегазовой аппаратуры в России с учетом основных мировых тенденций являются:

- ликвидация отставания от ведущих стран по обеспечению энергетических систем современным коммутационным оборудованием при одновременном снижении массогабаритных характеристик таких аппаратов, их стоимости и повышения надежности;
- разработка цифровых систем управления, диагностики и мониторинга аппаратов;
- разработка систем и методов прогнозирования срока службы коммутационного оборудования;
- разработка выключателей с синхронным включением.

В последние годы особое внимание вызывает возможная экологическая опасность элегаза. В этой связи следует отметить, что несмотря на

принадлежность к ряду фторидов, элегаз не включен в перечень веществ, которые подлежат запрету или ограничению в применении. Кроме того, общий вклад элегаза в "парниковый" эффект атмосферы составляет не более 0,2% (а доля элегаза электротехнического оборудования в этом вкладе значительно меньше).

Хотя преимущества элегазовых и вакуумных аппаратов очевидны, полный переход на их использование занимает не один год и не одно десятилетие. При постоянно растущей доле современной аппаратуры в эксплуатации остается еще немало устаревших аппаратов. Состав парка эксплуатируемых выключателей на напряжение 63 кВ и выше, а также динамика его изменения в мире по данным СИГРЭ¹ показаны на рис.4.

Вакуумные выключатели в основном используются в средних классах напряжения, поэтому на рис.4 их количество невелико.

Из рис.4 видно, что в последние 10 лет в классах напряжения 63 кВ и выше в мире не вводилось в эксплуатацию практически никаких других выключателей, кроме элегазовых. Если анализировать состав выключателей с возрастом от 10 до 20 лет, то и среди них явно преобладают элегазовые выключатели (кроме элегазовых выключателей в это десятилетие было введено еще примерно 30% маломасляных выключателей). И только среди выключателей с возрастом от 20 до 30 лет элегазовых выключателей меньше, чем маломасляных и воздушных, но больше, чем баковых масляных.

Несмотря на то, что серийное производство КРУЭ в России освоено с 70-х годов масштабы применения КРУЭ у нас в стране пока не соответствуют современным мировым тенденциям – в России установлено всего около 350 ячеек КРУЭ на напряжение от 110 до 220 кВ, в то время как, например, в Японии в тот же самый период выпущено около 7000 ячеек КРУЭ на напряжение от 77 до 800 кВ.

С другой стороны, в России КРУЭ разработаны на весь спектр номинальных напряжений – от 110 до 1150 кВ, и фактически созданы комплектно-распределительные устройства третьего поколения. К сожалению, большая часть этих разработок реализована только в рамках международных контрактов.

Смена поколений КРУЭ, как правило, происходит не реже, чем в 6–8 лет.

К особенностям последнего поколения КРУЭ можно отнести:

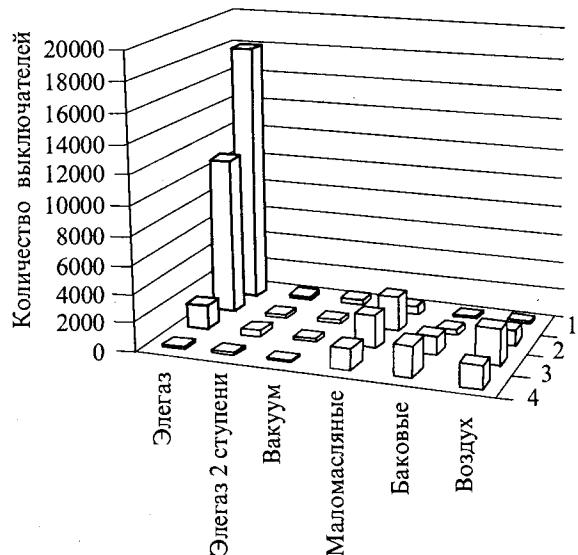


Рис.4. Распределение выключателей на напряжение 63 кВ и выше по способу дугогашения и продолжительности эксплуатации:

1 – >0, но < 10 лет; 2 – >10, но < 20 лет; 3 – > 20, но < 30 лет; 4 – > 30 лет

- число контактных пар выключателей вплоть до напряжений 362 кВ не более одного, а до напряжений 800 кВ – не более двух;
- токи отключения выключателей до 63 кА, номинальные токи до 8000 А;
- применение дугогасительных устройств с комбинированным принципом гашения дуги;
- КРУЭ снабжаются быстродействующими заземлителями на линейных выводах;
- КРУЭ обеспечиваются системами диагностики практически всех важнейших характеристик;
- в отношении коммутационных аппаратов – выключателей и разъединителей, быстродействующих заземлителей предъявляются более высокие требования по надежности при работе в некоторых режимах, например, при отключении емкостных токов, а также повышенены требования и по коммутационной способности после проведения рабочих операций;
- в элегазовых выключателях характерно доминирующее использование автономных приводов – пружинных и гидравлических.

Такие элегазовые коммутационные аппараты нового поколения созданы всеми ведущими фирмами, в том числе российским – Всероссийским электротехническим институтом им. В.И. Ленина и Научно-исследовательским институтом высоковольтного аппаратуростроения (г.Санкт-Петербург). Предприятием "Уралэлектротяжмаш" (г.Екатеринбург) освоено производство совре-

¹ Electra. 2000. № 191. Р.107–113.

менных элегазовых выключателей колонкового типа с пружинным приводом на напряжение 110–220 кВ.

Лучше в стране ситуация с развитием и внедрением вакуумной коммутационной аппаратуры. Вакуумная аппаратура имеет развитую производственную базу и стабильный серийный выпуск уже много лет.

Большой вклад в развитие и освоение вакуумной аппаратуры внес родоначальник этого направления – ВЭИ им. В.И. Ленина. Разработана и выпускается вся гамма аппаратов средних напряжений (до 110 кВ) – все, что пользуется спросом у потребителя. Серийный выпуск вакуумной аппаратуры начался еще в 70-е годы, когда был построен и запущен Минусинский завод вакуумных выключателей (МЗВВ). В настоящее время несколько заводов серийно выпускают ВДК и более десятка заводов – вакуумные выключатели.

Крупнейшим производителем вакуумной коммутационной аппаратуры в России в настоящее время является ФГУП НПП "Контакт" (г. Саратов), который выделяется среди других российских заводов широтой номенклатуры выпускаемых аппаратов и объемом выпуска. Это предприятие электронной промышленности в порядке конверсии в короткие сроки освоило широкий спектр вакуумных аппаратов высокого и низкого напряжения.

Наличие в эксплуатации морально и физически устаревших выключателей создает множество проблем для тех, кто их эксплуатирует. Эти проблемы и методы их решения в настоящее время активно изучаются в СИГРЭ.

Устаревшие выключатели по своим параметрам могут не соответствовать изменившимся за время эксплуатации условиям работы (могут измениться номинальный ток и ток КЗ, параметры ПВН и требования к временам срабатывания).

Для поддержания надежности энергоснабжения на должном уровне необходимо в ближайшие годы обновить по крайней мере 35% существующего парка высоковольтных коммутационных аппаратов.

Устаревшие выключатели расточительны из-за высоких эксплуатационных расходов самих выключателей и систем их обеспечения (компрессорных установок, систем воздухоподготовки, маслохозяйств и др.). Эта проблема особенно актуальна для энергосистем, где используются практически только масляные и воздушные выключатели, например, энергосистемы РАО ЕЭС.

Эксплуатация устаревших выключателей связана с повышенным риском, высокой аварийностью, возникновением экологических и других проблем.

При наличии остаточного срока службы аппарат следует оставлять в эксплуатации только тогда, когда выгода от этого решения заметно превосходит все возможные неприятные последствия.

Таким образом, несмотря на постепенную замену устаревших типов аппаратов в мире (и особенно в России) в эксплуатации остается большое количество выключателей, срок службы которых превысил 20 и даже 30 лет. Поэтому разработка методов определения остаточного срока службы, обобщение опыта эксплуатации, определение целесообразности дальнейшей эксплуатации аппаратов также является в настоящее время актуальной задачей.

Тот факт, что на мировом рынке до 2010 г. не видно серьезной альтернативы элегазовым и вакуумным выключателям, не означает прекращения работ по совершенствованию коммутационной аппаратуры.

Улучшаются дугогасительные устройства, применяются новые решения по повышению эффективности дугогашения.

Используется комбинация способов гашения дуги в элегазовых выключателях. Получивший в последние годы широкое распространение способ автогенерации давления имеет большие преимущества, вследствие уменьшения тяговых усилий привода и его энергии. Однако при простом переходе от автопневматического способа к принципу автогенерации возможно снижение надежности отключения в некоторых режимах, в первую очередь при отключении емкостных токов.

Поэтому применяют комбинацию обоих способов – используется уменьшенный ход поршня, в результате чего интенсивная автокомпресия происходит только в первой половине движения поршня. В это время и обеспечивается высокая электрическая прочность в промежутке между контактами при отключении емкостных токов. В дальнейшем поршень и компрессионный цилиндр двигаются вместе, и при необходимости отключать большие токи (токи КЗ) давление и обдув дуги создаются за счет нагрева газа самой дугой (автогенерации давления).

Используется также элегазовое дугогасительное устройство с двумя подвижными контактами. В результате, скорость контактов может быть в 2 раза меньше, а следовательно, меньше

и требуемая мощность привода при необходимом давлении газа.

Уменьшение энергоемкости привода делает возможным применение экономичного и надежного пружинного привода для элегазовых выключателей до напряжения 245 кВ и выше.

Повышение эффективности дугогашения дает возможность увеличить напряжение на один разрыв выключателя. В настоящее время уже созданы выключатели на напряжение 362–550 кВ с одним разрывом.

Ведутся также работы по совершенствованию КРУЭ путем объединения функций различных аппаратов в одном модуле (например, объединение функций выключателя, разъединителя и заземлителя в одном устройстве) путем создания КРУЭ с размещением трех фаз в одной оболочке вплоть до напряжения 500 кВ.

Такие решения позволяют сделать аппаратуру более компактной, уменьшить требуемые для КРУЭ площади и объемы помещений, повысить технико-экономические показатели.

Проводятся работы по дальнейшему совершенствованию контактных систем ВДК, поиску оптимального распределения магнитного поля для эффективного гашения вакуумной дуги и уменьшения диаметра камер.

Продолжаются работы по созданию ВДК на напряжение более 35 кВ (110 кВ и выше) для вакуумных выключателей высокого напряжения.

Разрабатываются вакуумные выключатели нагрузки, способные конкурировать с аналогичными выключателями с воздушной и элегазовой изоляцией.

В таких выключателях вакуумная дугогасительная камера выполняет только функцию гашения дуги, а требования по пропусканию номинального тока и обеспечения электрической прочности в разомкнутом состоянии выполняются за счет других элементов выключателя. Благодаря небольшой цене вакуумной камеры такой вакуумный выключатель нагрузки не намного дороже традиционных. Если учесть очень высокий коммутационный ресурс вакуумных камер, применение вакуумного выключателя нагрузки становится экономически оправданным.

Вакуумная аппаратура начинает использоваться при низком напряжении – 1140 В и ниже, причем не только в виде контакторов, но и выключателей, аппаратов управления.

Все чаще разрабатываются вакуумные аппараты специального назначения переменного и постоянного тока – выключатели для подвижного состава городского и железнодорожного

транспорта, для судов и кораблей, генераторных цепей, коммутации накопителей энергии и защиты оборудования от перегрузок и перенапряжений (управляемые вакуумные разрядники) и других целей.

Продолжают проводиться работы по замене элегаза на смеси элегаза с другими газами, а также использованию в коммутационных аппаратах других газов.

Если говорить об уровне развития коммутационной аппаратуры в мире, то уровень разработок элегазового и вакуумного коммутационного оборудования достиг определенного совершенства и, в основном, удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым потребителями. Однако постоянное стремление обеспечить еще более высокие технико-экономические требования, до минимума уменьшить воздействие коммутационных аппаратов на окружающую среду приводит к поиску новых решений.

В этой связи представляет интерес выбор альтернативы элегазовым и вакуумным выключателям.

Среди альтернативных решений по-прежнему рассматривается возможность использования других изоляционных и дугогасительных сред.

Перспективна полупроводниковая технология. Однако она еще не может удовлетворить в достаточной степени требования, предъявляемые к коммутационным аппаратам, но тенденция дальнейшего развития в этом направлении существует.

Исследуется возможность создания эффективных ограничителей тока на базе высокотемпературных сверхпроводящих материалов. Такие ограничители тока не только решают задачи коммутации электрических цепей, но и позволяют облегчить энергетическое оборудование за счет уменьшения токов термической и динамической устойчивости.

Однако параметры полупроводящих приборов и характеристики сверхпроводящих материалов в настоящее время таковы, что в ближайшее время не следует ожидать их широкого практического применения в ограничителях тока.

Развитие ограничителей токов КЗ и соответствующее упрощение конструкции выключателей, как одно из основных направлений создания подстанционного оборудования будущего, до настоящего времени тормозилось техническими и экономическими факторами, однако перспектива их использования очевидна.

Работы по созданию "умных" аппаратов проводятся в двух направлениях – разработка выключателей с управляемой (синхронной) коммутацией и создание систем автоматизированной диагностики и мониторинга.

Преимущества выключателей с управляемой коммутацией (позволяющих обеспечить уменьшение бросков тока, перенапряжений, увеличение ресурса) известны давно. В настоящее время такие выключатели все чаще используются на практике, поскольку в последние годы были созданы простые, малоэнергоемкие привода выключателей со стабильными характеристиками, а также более совершенные системы управления. За рубежом уже установлено около 1000 таких выключателей.

Характеристики синхронных аппаратов могут быть улучшены, если включение аппарата осуществляется путем пробоя промежутка (за время около 1 мкс) в любой заданный момент времени с очень высокой точностью. При этом аппарат имеет и контактную систему, которая после пробоя обеспечивает металлическое соединение на завершающей стадии включения, а также способна гасить сильноточную дугу в процессе отключения. Прототип такого аппарата создан и испытан в ВЭИ им. В.И. Ленина.

Системы диагностики дают возможность прогнозировать изменение изоляционных, коммутационных и других характеристик аппаратов в эксплуатации, своевременно обнаруживать опасные отклонения этих характеристик от номинальных и тем самым, с одной стороны, предотвратить ненужные ревизии аппарата, а с другой, избежать крупных аварий.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что направления развития коммутационной аппаратуры в России во многом совпадают с мировыми тенденциями развития. Проводятся работы по созданию современных видов аппаратуры (элегазовых и вакуумных выключателей, КРУЭ и др.), расширяются области применения современной аппаратуры, периодически разрабатываются аппараты новых поколений.

Вместе с тем темпы роста количества новых аппаратов в эксплуатации сильно отстают от

аналогичных показателей развитых стран (особенно в области элегазовых аппаратов). Это объясняется несколькими причинами. Среди них и недостаток финансовых средств, вынуждающий потребителей эксплуатировать давно устаревшие аппараты, и сокращение строительства новых подстанций, и отсутствие промышленного выпуска всей гаммы элегазовой аппаратуры, применяемой за рубежом, и консерватизм потребителей коммутационной аппаратуры высокого напряжения.

При этом объем продажи на российском рынке зарубежной элегазовой аппаратуры значительно превосходит объем продажи отечественных элегазовых аппаратов. Российским производителям аппаратов все труднее конкурировать с зарубежными из-за технологической отсталости и отсутствия средств на техническое перевооружение.

Без комплексных мер, объединяющих усилия разработчиков, производителей и пользователей коммутационной аппаратуры, отсталость парка находящихся в эксплуатации аппаратов может стать необратимой.



Белкин Герман Сергеевич – начальник отдела вакуумной коммутационной аппаратуры ВЭИ им. В.И. Ленина. В 1962 г. окончил электро-энергетический факультет МЭИ. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Работоспособность контактов из многокомпонентных материалов в высоковольтных вакуумных аппаратах".

Вариводов Владимир Николаевич – начальник отдела элегазовой аппаратуры ВЭИ им. В.И. Ленина. В 1971 г. окончил электро-энергетический факультет МЭИ. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Внутренняя изоляция газонаполненного оборудования сверхвысокого и ультравысокого напряжения".



Адаптивные методы определения коммутационных характеристик выключателей

БЕЛКИН Г.С.

Рассмотрены адаптивные методы определения коммутационных характеристик выключателей различного типа. Проведено сравнение методов определения характеристик выключателей с плотной дугогасительной средой и вакуумных выключателей. Для различных моделей процесса отключения показано, какие постоянные должны определяться с помощью предварительного эксперимента.

В настоящее время теоретический анализ коммутационных процессов в электрических аппаратах широко применяется как при разработке аппаратов, так и в процессе их испытаний. Такой анализ даёт возможность выбрать наилучшие технические решения, оптимизировать конструкцию, сократить объем необходимых испытаний аппарата. Трудности при теоретическом анализе процесса отключения цепи (особенно в районе нуля тока) связаны с необходимостью описания дуговых процессов, определяющих результат операции отключения.

Существуют три подхода к описанию дуги отключения [1], применяемые, как правило, при анализе коммутационных процессов в выключателях с газовым дутьём. Физический подход основан на детальном учете протекающих при горении дуги процессов в дугогасительных устройствах и связан с решением фундаментальных уравнений газодинамики. В рамках адаптивных методов (методов "черного ящика") дуговые процессы детально не рассматриваются. Используется упрощенное уравнение баланса мощности и допущение об однозначной связи сопротивления дуги с её теплосодержанием. Такие модели впервые были предложены Касси и Майром. В соответствии с этими моделями отказ при отключении наступает в результате теплового пробоя. При использовании адаптивных методов некоторые параметры дуги, входящие в уравнения, определяются по результатам предварительных испытаний, и с их помощью прогнозируется поведение выключателя при коммутации, например, оценивается предельная отключающая способность. Третий подход основан на применении различных зависимостей и соотношений, полученных эмпирически или аналитическим путем.

Адаптивные модели дуги отключения, разработанные для определения характеристик выключателей с газовым дутьём, не подходят для прогнозирования характеристик вакуумных

выключателей. Если предельный ток отключения выключателей с газовым дутьём определяется балансом мощности в столбе дуги в районе перехода тока через нуль, то предельная отключающая способность вакуумных выключателей связана с процессами нагрева и охлаждения контактов, концентраций паров материала контактов в районе нуля тока. Для определения коммутационных характеристик вакуумных выключателей также может быть использован адаптивный подход, т.е. для нахождения некоторых параметров дуги, входящих в уравнения, проводится предварительный эксперимент.

В настоящей статье проведено сравнение адаптивных методов определения коммутационных характеристик газовых и вакуумных выключателей.

Предельная отключающая способность выключателей с газовым дутьём

Характеристики дуги отключения зависят от тока в дугогасительном устройстве (ДУ) и напряжения на нём, т.е. от параметров отключаемой цепи. В свою очередь, характеристики дуги влияют на ток и напряжение на ДУ при отключении цепи. На рис.1 показана схема замещения цепи при КЗ на выводах выключателя. На характер изменения тока и напряжения в этой схеме оказывают влияние как параметры цепи, так и скорость спада проводимости ДУ. Если харак-

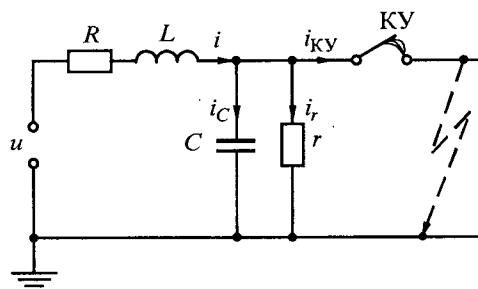


Рис.1. Схема замещения при КЗ у выключателя

теризовать скорость процесса спада проводимости ДУ подкасательной τ_d зависимости прово-

димости от времени $\frac{1}{R_d}(t)$, то можно выделить

два различных режима коммутации, при которых возможно успешное гашение дуги. В первом режиме выполняется условие

$$\tau_d = -\frac{1}{R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right)} < \tau_{d,kp} \quad (\tau_{d,kp} \text{ — критическое}$$

значение подкасательной зависимости $\frac{1}{R_d}(t)$),

во втором режиме условие $\tau_d > \tau_{d,kp}$ справедливо до перехода тока в ДУ через нуль.

Для схемы замещения на рис.1 нетрудно получить следующие выражения:

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{di}{dt} + \frac{i_d}{\tau_d} - \frac{i_C}{\tau_{R_d C}} - \frac{i_C}{\tau_{rC}}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_d} \frac{du_d}{dt} = \frac{di}{dt} + \frac{i_d}{\tau_d} - \frac{di_C}{dt} - \frac{i_C}{\tau_{rC}}, \quad (2)$$

где $\tau_{R_d C} = R_d C$ — величина, характеризующая процесс разряда ёмкости C на сопротивление R_d ; $\tau_{rC} = rC$ — постоянная времени разряда ёмкости C на сопротивление r .

При $\tau_d = \tau_{d,kp}$ соотношения (1) и (2) дают значения

$$\frac{di_C}{dt} = 0; \frac{du_d}{dt} = 0; i_C = 0.$$

Если при приближении тока i к естественному нулю сохраняются достаточно большие значения подкасательной ($\tau_d > \tau_{d,kp}$) то, как видно из выражений (1), (2), токи и напряжение на ДУ изменяются монотонно до нуля тока

$\left(\frac{di_C}{dt} < 0 \text{ и } \frac{du_d}{dt} < 0 \right)$. Характер зависимостей

токов и напряжения на ДУ в этом режиме показан на рис.2.

Если же при подходе тока i к нулю подкасательная τ_d становится достаточно малой, что

выполняются условия $\frac{di_C}{dt} > 0$ и $\frac{du_d}{dt} > 0$ (по

выражению (1) и (2)), то происходит вытеснение тока из ветви с ДУ в параллельные ветви, появляются пик гашения и сдвиг между моментами прекращения тока в ДУ и начала восстановле-

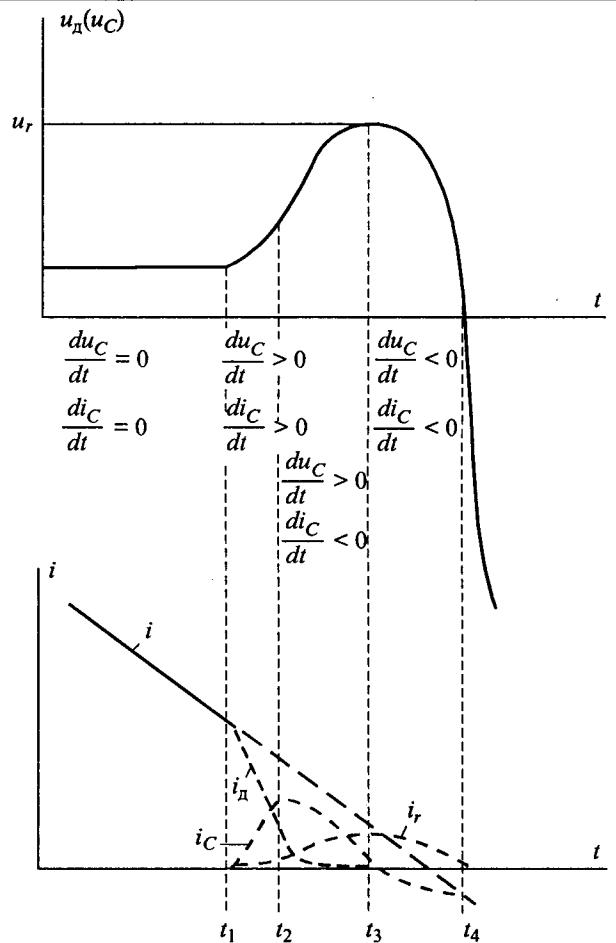


Рис.2. Отключение цепи высокого напряжения при малых τ_d

ния напряжения на нём (рис.3). В режиме, показанном на рис.2, способны гасить дугу только выключатели, характеризующиеся очень высокой скоростью восстановления электрической прочности после нуля тока в ДУ (например газовые).

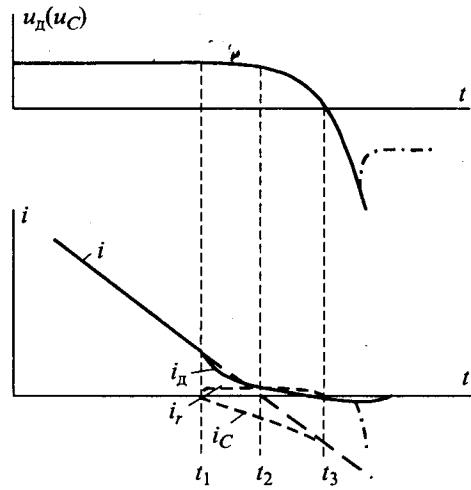


Рис.3. Отключение цепи высокого напряжения при больших τ_d :

— — успешное отключение; - - - - отказ

Различные модели дуги отключения, начиная с моделей Касси и Майра, дают возможность связать сопротивление дуги и значение подкасательной τ_d с интегральными энергетическими характеристиками.

В соответствии с моделью дуги, предложенной Майром, справедливо выражение вида:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{v_m} \left(\frac{u_d i_d}{P} - 1 \right), \quad (3)$$

а в соответствии с моделью Касси

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{v_c} \left(\frac{E^2}{E_0^2} - 1 \right), \quad (4)$$

где P – отводимая от столба дуги мощность; $E_0 = \sqrt{\rho P_{уд}}$; ρ – удельное электрическое сопротивление плазмы столба дуги; $P_{уд}$ – мощность, отводимая от единицы объема дуги; E – напряжение поля в столбе дуги; v_m , $v_c = \frac{q_{уд}}{P_{уд}}$ – постоянные; $q_{уд}$ – теплосодержание единицы объема дуги.

Как видно из выражений (3), (4), значение подкасательной τ_d зависит от энергетических характеристик дуги в относительных единицах. Например, по модели Майра мгновенное значение относительного значения подкасательной

$\tau_{d*} = \frac{\tau_d}{v_m}$ зависит только от отношения $\frac{ui}{P}$:

$$\tau_{d*} = \frac{1}{1 - \frac{ui}{P}}. \quad (3')$$

Чем меньше $\frac{ui}{P}$, тем ближе τ_d к v_m , и в конце процесса гашения дуги ($ui \ll P$) $\tau_{d*} \approx 1$.

Входящие в уравнения (3), (4) постоянные определяются с помощью предварительных экспериментов. Как показывает опыт, лучшие результаты дают модели дуги, в которых v и P предполагаются зависимыми от проводимости дуги. Тогда уравнения (3), (4) записываются в обобщенном виде:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{v \left(\frac{1}{R_d} \right)} \left[\frac{u_d i_d}{P \left(\frac{1}{R_d} \right)} - 1 \right]. \quad (5)$$

Из практики известно, что зависимости

$v \left(\frac{1}{R_d} \right)$ и $P \left(\frac{1}{R_d} \right)$ могут быть достаточно хоро-

шо аппроксимированы степенными функциями:

$$v \left(\frac{1}{R_d} \right) = v_0 \left(\frac{1}{R_d} \right)^\alpha; \quad (6)$$

$$P \left(\frac{1}{R_d} \right) = P_0 \left(\frac{1}{R_d} \right)^\beta, \quad (7)$$

где v_0 , P_0 , α , β – постоянные, для определения которых проводятся предварительные испытания.

Физический смысл аппроксимации зависимо-

стей $v \left(\frac{1}{R_d} \right)$ и $P \left(\frac{1}{R_d} \right)$ с помощью выражений (6)

и (7) можно раскрыть, если использовать следующую модель. Пусть температура столба дуги и его удельное электрическое сопротивление не меняются с изменением тока, как в модели Касси, т.е. сопротивление дуги и её теплосодержание изменяются во времени только за счет изменения радиуса столба. Теплоотвод же от столба дуги осуществляется, в основном, за счет конвекции, и отводимая мощность пропорциональна не объему столба, а площади его боковой поверхности, т.е. выражается $P_F F$ (P_F – отводимая с единицы площади поверхности столба мощность; F – площадь боковой поверхности дуги).

При этих допущениях выражение (4) примет вид:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{v_0 \left(\frac{1}{R_d} \right)^{0.5}} \left(\frac{ui}{P_0 \left(\frac{1}{R_d} \right)^{0.5}} - 1 \right), \quad (8)$$

где

$$v_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\rho l} \frac{q_{уд}}{P_F}; \quad (9)$$

$$P_0 = 2\sqrt{\pi} \sqrt{\rho l} P_F; \quad (10)$$

l – длина столба дуги.

Из выражений (8)–(10) вытекает, что α и β близки к 0,5. На самом деле, входящие в v_0 и P_0 величины зависят от тока (от проводимости столба), так что α и β могут быть больше, чем 0,5. Если принять, что $\rho = 10^{-3}$ Ом·м, $P_F = 10^9$ Вт/м² $\frac{q_{уд}}{P_F} = 6000$ мкС/м и $l = 0,1$ м, то из выражений

(9) и (10) получим для v_0 и P_0 соответственно значения 20 мкс· $\text{Ом}^{1/2}$ и 3 МВт· $\text{Ом}^{1/2}$.

Малые значения подкасательной τ_d , как следует из выражений (8)–(10), могут быть получены, если реализуются большие P_F и l , а также малые q_{ud} .

Существуют различные методы [2] определения v_0 , P_0 , α и β с помощью предварительных испытаний. После их определения можно оценить предельную отключающую способность исследуемого аппарата и, при необходимости, внести изменения в его конструкцию.

Оценка отключающей способности вакуумных выключателей

В отличие от выключателей с плотной дугогасительной средой, отключающая способность которой определяется условиями отвода энергии от столба дуги, отключающая способность вакуумных выключателей связана с условиями нагрева и охлаждения анода и его температурой в момент перехода тока через нуль. Поэтому при оценке отключающей способности вакуумных выключателей рассчитывается температура поверхности анода в момент нуля тока, и эта температура сравнивается с допустимой по условию достаточной электрической прочности промежутка.

Если считать, что напряжение горения дуги не меняется во времени и теплофизические свойства материала контактов не зависят от температуры, то задача определения предельной отключающей способности сводится к решению уравнения теплопроводности в одномерном приближении [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (11)$$

при следующих граничных условиях:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{K_h I_m U'_a \left(\sin \omega t + \frac{\beta}{100} \right)}{F_k}; \quad (12)$$

$$T \left(0, \frac{\pi}{\omega} \right) \leq T_{\text{доп}}; \quad (13)$$

$$T(\infty, t) = T_0 \quad (14)$$

и начальном условии

$$T(x, 0) = T_0. \quad (15)$$

Здесь T – температура; a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; K_h – коэффициент неоднородности теплового потока (отношение площади по-

верхности контакта к площади, занимаемой дугой); I_m – амплитуда периодической составляющей тока; U'_a – эквивалентное прианодное падение напряжения; ω – круговая частота; β – процентное содержание апериодической составляющей тока; $T_{\text{доп}}$ – допустимая по условиям отключения температура поверхности анода; T_0 – температура окружающей среды.

Эквивалентное прианодное падение напряжения численно равно энергии, переносимой к аноду при протекании через дугу заряда в 1 Кл. При постоянных во времени U'_a и площади, занимаемой дугой, тепловой поток на поверхности анода пропорционален току КЗ. Если предположить, что β слабо изменяется в течение полупериода тока, то температуру поверхности можно представить как сумму двух составляющих – при синусоидальной зависимости теплового потока на поверхности от времени и при постоянном во времени тепловом потоке.

Выражение, описывающее изменение температуры поверхности во времени в течение полупериода тока, записывается в виде:

$$T_n = \frac{\sqrt{2} q_m}{\sqrt{\lambda c \gamma \omega}} \left\{ C \left[\left(\frac{2 \omega t}{\pi} \right)^{0.5} \right] \sin \omega t - S \left[\left(\frac{2 \omega t}{\pi} \right)^{0.5} \right] \cos \omega t \right\} + \frac{2 \frac{\beta}{100} q_m \sqrt{t}}{\sqrt{\pi} \sqrt{\lambda c \gamma}}, \quad (16)$$

где

$$q_m = \frac{K_h I_m U'_a}{F_k}; \quad (17)$$

$$C(z) = \int_0^z \cos 0.5(\pi t)^2 dt, \quad S(z) = \int_0^z \sin 0.5(\pi t)^2 dt$$

– интегралы Френеля; c – удельная теплоёмкость; γ – плотность материала контактов.

Если использовать условие $T \left(0, \frac{\pi}{\omega} \right) = T_{\text{доп}}$, то

из выражения (16) можно получить соотношение для предельного тока отключения (действующее значение):

$$I_{\text{откл}} = \frac{T_{\text{доп}} F_k (\lambda c \gamma \omega)^{0.5}}{\sqrt{2} K_h \left(0.7 \sqrt{2} + 2 \frac{\beta}{100} \right) U'_a}. \quad (18)$$

Вид выражения (18) соответствует определяемым экспериментально зависимостям предельного тока отключения от диаметра контактной

системы. Для оценки отключающей способности с помощью соотношения (18) необходимо знать коэффициент неоднородности K_h и тепловой параметр $c^* = \frac{U'_a}{T_{\text{доп}}}$. Для определения коэффициента K_h рассчитывается распределение индукции магнитного поля в межконтактном промежутке и оценивается площадь поверхности контактов, которая может перекрываться дугой [3].

Чтобы определить входящее в выражение (18) отношение $U'_a / T_{\text{доп}}$, требуется проведение предварительных испытаний одной из вакуумных дугогасительных камер (ВДК) серии для определения предельного тока отключения при выбранном контактном материале и заданном значении содержания апериодической составляющей β .

По результатам такого эксперимента можно оценить отношение $U'_a / T_{\text{доп}}$:

$$\frac{U'_a}{T_{\text{доп}}} = \frac{F_k(\lambda c \gamma \omega)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2} K_h \left(0,7\sqrt{2} + 2 \frac{\beta}{100} \right) I_{\text{откл}}} \quad (18')$$

Определив коэффициент неоднородности и отношение $U'_a / T_{\text{доп}}$, нетрудно расчетным путем оценить отключающую способность серии ВДК, выбрать диаметр контактной системы для них при различных токах отключения и различном процентном содержании апериодической составляющей. Так, в [3] было определено, что для ряда контактных систем с продольным и поперечным магнитным полем выражение (18) даёт значения отключающей способности, близкие к

экспериментальным при $\frac{U'_a}{T_{\text{доп}}} = 0,014 B / K$ (для

контактных систем с продольным магнитным полем) и $0,02 B / K$ (для контактных систем с поперечным магнитным полем). В качестве контактного материала использовалась композиция хром–медь 50 (50% меди по массе). Если считать, что в этом случае допустимая температура $T_{\text{доп}} = 1400 \text{ К}$, то эквивалентное прианодное падение напряжения при указанных значениях $U'_a / T_{\text{доп}}$ составит 20 В для контактных систем с продольным магнитным полем и около 30 В для контактных систем с поперечным магнитным полем.

Последовательность определения предельной отключающей способности вакуумного выключателя

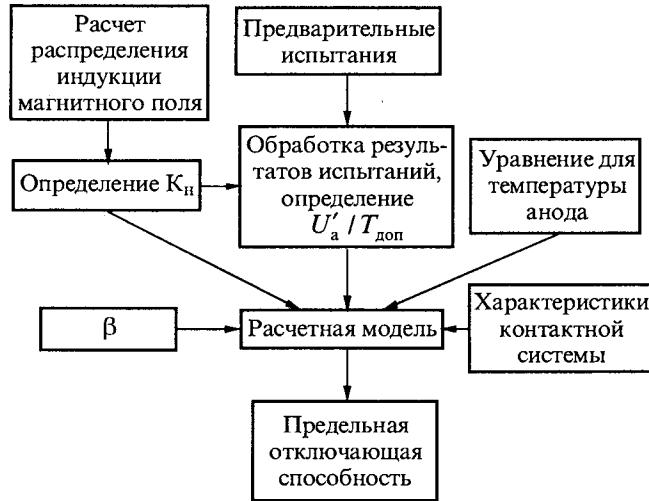


Рис.4. Последовательность определения отключающей способности вакуумных выключателей

чателя схематически показана на рис.4. Метод определения отключающей способности является адаптивным, так как тепловой параметр $U'_a / T_{\text{доп}}$ определяется по результатам предварительных испытаний образца ВДК.

Определение характеристик тока среза в вакуумных выключателях

Расчетное определение характеристик тока среза связано с предварительным экспериментом, по результатам которого находятся необходимые для расчета параметры, т.е. связано с применением адаптивного подхода. Устойчивость вакуумной дуги при малых токах определяется устойчивостью катодных пятен, которые являются источником нейтральных и заряженных частиц. Описание катодных процессов, включая процессы распада катодных пятен и появление новых пятен, представляет значительные трудности. Задача определения распределения вероятностей тока среза может быть облегчена при использовании адаптивного подхода.

Как известно, вероятность продолжительности горения вакуумной дуги постоянного тока распределяется по случайному закону [4]:

$$P_d(t_d > t) = \exp\left(-\frac{t}{v_d}\right), \quad (19)$$

где v_d – средняя продолжительность горения дуги; t_d – время горения дуги; $P_d(t_d > t)$ – вероятность горения дуги с продолжительностью более t .

Распределение длительностей горения дуги при переменном токе соответственно имеет вид [5]:

$$P_d(t_d > t) = \exp\left(-\int_{t_0}^t \frac{dt}{\omega v_d}\right), \quad (20)$$

где t_0 – момент зажигания дуги.

Используя выражение (20), нетрудно получить соотношения для распределения вероятностей тока среза при отключении переменного тока в вакууме для различных ωt_0 :

если $\omega t_0 < \pi - \omega t_{cp}$, то

$$P_d(i_{cp} > i) = \exp\left[-\int_{\omega t_0}^{\pi - \omega t_{cp}} \frac{d(\omega t)}{\omega v_d}\right] - \exp\left[-\int_{\omega t_0}^{\omega t_{cp}} \frac{d(\omega t)}{\omega v_d}\right], \quad (21)$$

если $\omega t_0 \geq \pi - \omega t_{cp}$, то

$$P_d(i_{cp} > i) = 1 - \exp\left[-\int_{\omega t_0}^{\omega t_{cp}} \frac{d(\omega t)}{\omega v_d}\right], \quad (22)$$

где ω – круговая частота тока; ωt_0 – фаза тока в момент появления дуги; ωt_{cp} – максимальная фаза тока в момент среза при условии $i_{cp} > i$.

С помощью выражений (21), (22) можно оценить вероятность появления больших токов среза и связанных с ними опасных перенапряжений. Для этого необходимо знать зависимость средней длительности горения дуги от тока $v_d(I)$ при постоянном токе. Для вакуумной дуги постоянного тока средняя продолжительность горения v_d связана с током следующим соотношением [4]:

$$v_d = v_k \exp \psi_k (I - I_k), \quad (23)$$

где v_k, ψ_k, I_k – постоянные, характерные для участков зависимости $v_d(I)$.

В диапазоне токов 1–50 А при экспериментах [4] наблюдалась один или два участка зависимости $v_d(I)$, т.е. k принимало значение 0 или 1 (рис.5). При этом I_0 имеет смысл порогового тока, а v_0 – средней продолжительности горения дуги при этом токе.

Соотношения (21)–(23) можно использовать для определения распределения вероятностей тока среза. Процедура оценки вероятности появления опасных токов среза сводится к следующему (рис.6). Предварительно проводится эксперимент при интересующих нас условиях по определению постоянных v_k, ψ_k, I_k , которые входят в уравнение зависимости средней продолжительности горения вакуумной дуги при постоянном токе (23). Если эти постоянные ранее определены экспериментально для интересующих нас условий (материала контактов, диапазона

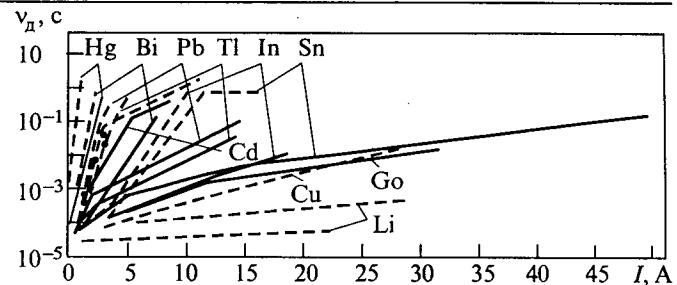


Рис.5. Результаты измерений средней продолжительности существования дуги в функции тока для ряда жидких (1) и твердых (2) катодов:
— 1; - - - 2; • – Au



Рис.6. Последовательность определения распределения вероятностей тока среза при отключении тока в вакууме

токов, параметров цепи и др.), то их значения принимаются для последующих расчетов. Зная зависимость $v_d(I)$ при постоянном токе, можно определить распределение вероятностей тока среза при различных действующих значениях отключаемого переменного тока и фазах тока в момент размыкания контактов.

Результаты такого расчета распределения вероятностей тока среза при отключении переменного тока 21 А сравниваются с экспериментальными результатами на рис.7, где для примера показаны данные для медных контактов. Расчет проводился с помощью выражений (21), (22) с использованием постоянных зависимостей $v_d(I)$ для постоянного тока, приведенных на рис.5. Даже при неодинаковых параметрах коммутируемой цепи при экспериментах с постоянным и переменным током можно отметить неплохое соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей на рис.6. С помощью распределения вероятностей тока среза оценивается и вероятность появления опасных перенапряжений

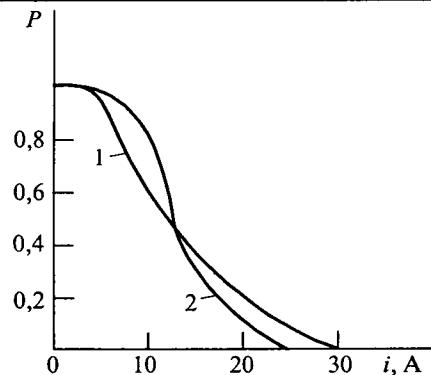


Рис.7. Распределение вероятностей тока среза для медных контактов при отключении тока 21 А в вакууме:

1 – расчет; 2 – эксперимент

в результате среза тока. При необходимости принимаются меры для ограничения перенапряжений при отключении цепи.

Выводы

1. Адаптивные подходы пригодны для определения характеристик не только выключателей

с плотной дугогасительной средой, но и вакуумных выключателей. Процессы при отключении предельных токов этими выключателями и модели, их описывающие, различны. Различны и постоянные, которые определяются с помощью предварительного эксперимента.

2. Для вакуумных выключателей адаптивные методы оказываются полезными как при оценке предельной отключающей способности (при выборе диаметра контактной системы), так и при определении распределения токов среза.

Список литературы

1. Survey of calculation methods and application guide // Electra. 1988. № 118. Р.65–79.
2. Серяков К.И., Чемерис В.С. Вакуумное и элегазовое коммутационное оборудование // Электрические аппараты. Т.5. М.: ВИНТИ, 1990.
3. Белкин Г.С., Данилов М.Е., Клешнин Н.И. и др. К расчету отключающей способности вакуумных дугогасительных камер // Электричество. 2001. № 9. С.89–94.
4. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968.
5. Белкин Г.С. К расчёту тока среза в вакуумных выключателях // Электричество. 1971. № 2. С.75–77.

Оптимизация дугогасительных устройств высокого напряжения в режиме коммутации емкостных токов

БЕРЛИН Б.Е., ВИШНЕВСКИЙ Ю.И., ПЕЛЬЦ А.С., ТОНКОНОГОВ Е.Н., ЯРМАРКИН М.К.

Представлена расчетная методика, позволяющая оценить поведение выключателей высокого напряжения заданной конструкции в режиме коммутации емкостной нагрузки. В основе методики лежат расчеты электрических полей и динамические расчеты газовых потоков. Совмещение результатов расчетов позволяет оценить критические зоны конструкции и целенаправленно изменять конструкцию с целью повышения коммутационной способности.

Коммутация емкостных токов является одним из основных режимов, определяющих коммутационную способность современного выключателя высокого напряжения (В). Выключатель считается выдержавшим испытания, если в процессе отключения не наблюдались повторные пробои, т.е. если после погасания дуги на размыкающихся контактах нарастающая электрическая

The design procedure, permitting to evaluate the behavior of HV circuit breakers of a given design in capacitive current switching duty is presented in the Article. The computations of electrical fields and the dynamic computations of gas flows are underlying in the basis of a procedure. The coincidence of computation results allows to evaluate the critical areas of the design and to change purposefully the design to increase a switching performance.

прочность межконтактного промежутка постоянно выше приложенного к контактам переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН).

Особенностями режима отключения емкостных токов выключателями высокого напряжения являются:

- малые значения отключаемого тока и, как следствие, малые времена дуги, малые расстоя-

ния между контактами к моменту погасания дуги и практическое отсутствие плазмы в межконтактном промежутке;

– достаточно большие значения ПВН, которые могут превосходить двойное значение амплитуды фазного напряжения.

К основным факторам, определяющим результат отключения, можно отнести следующие: электрическое поле дугогасительного устройства в процессе движения контактов; распределение плотностей газа в межконтактном промежутке при движении контактов, определяемое газодинамическими процессами.

В настоящей работе процесс отключения емкостных токов рассматривается на примере конструкции дугогасительного устройства (ДУ) элегазового выключателя с автогазовым дутьем, в котором при движении контактов автоматически происходит активное перемещение дугогасящей среды (элегаза) в межконтактном промежутке. На основании математического моделирования и прямого физического эксперимента выполнен анализ степени влияния напряженности электрического поля и плотности газа на элементах ДУ и сделаны выводы относительно методики выбора параметров ДУ по условию отключения емкостных токов.

ДУ современных элегазовых выключателей ВН имеют ставшую уже типовой конструкцию (рис.1), в которой имеется неподвижный контакт (НК) 1 в форме стержня со скруглением на торце, подвижный контакт (ПК) 2, играющий одновременно роль сопла при организации потока газа между размыкающимися контактами, а также диэлектрическое сопло 3, формирующее необходимые параметры газового потока. Для защиты контакта от эрозии под действием электрической дуги ПК снабжен диэлектрической

насадкой 5. Для снижения напряженности на контактах ДУ применяются внутренние экраны 4 и 6 и внешние экраны 7 и 8.

Конструкции различных изготовителей отличаются геометрическими размерами элементов ДУ, начальным давлением заполнения, скоростью движения контактов, а также способом организации автогазового дутья: с помощью подвижного поршня (рис.1,а) или подвижного цилиндра (рис.1,б). Последняя из особенностей ДУ оказывает также влияние на формирование электрического поля в межконтактном промежутке. По ряду важных для конструирования параметров система с подвижным поршнем оказывается предпочтительной. К ним относятся, прежде всего, снижение массы движущихся элементов, а также большая простота и технологичность конструкции. Система ДУ с движущимся поршнем традиционно используется в конструкциях выключателей на сверхвысокие напряжения. Это служит основанием для анализа таких систем в настоящей работе.

В конструкции с движущимся поршнем экран 4 неподвижен; его экранирующая роль существенна при полностью разомкнутых контактах, однако значительно менее эффективна при меньших расстояниях между контактами, характерных для отключения емкостных токов. Таким образом, в конструкции с подвижным поршнем (рис.1,а) формирование электрического поля у торца ПК определяется главным образом формой самого контакта и длиной межконтактного промежутка, и в меньшей степени – наличием внешних экранов.

При характерных для современных выключателей скоростях движения контактов 8–12 м/с и частоте восстановления напряжения 50 или 60 Гц, момент достижения максимума ПВН (соответственно через 10 или 8,7 мс после размыкания) соответствует длине межконтактного промежутка 70–100 мм. Эти соотношения верны для наиболее неблагоприятного случая – минимального времени дуги, не превышающего 1 мс.

На рис.2 изображена расчётная модель для определения параметров электрического поля между расходящимися контактами ДУ. Потенциалы контактов во время отключения определяются классом напряжения В, числом последовательных разрывов, наличием шунтирующих емкостей, схемой включения и т.п. При этом расчеты показывают (рис.3), что значение максимальной напряженности на контактах не меняется в зависимости от того, со стороны подвижного или неподвижного контактов к В прило-

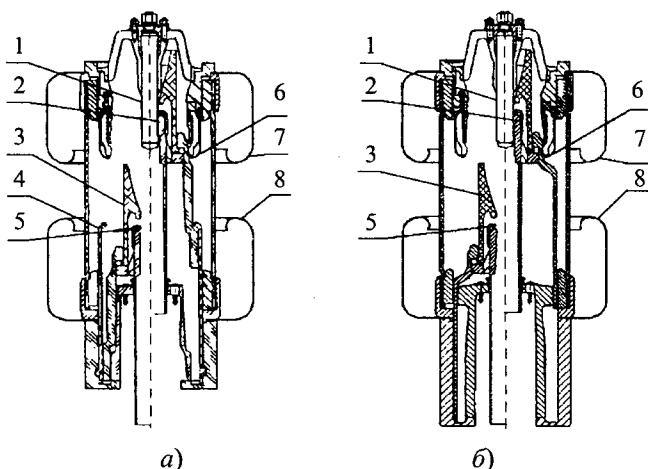


Рис.1

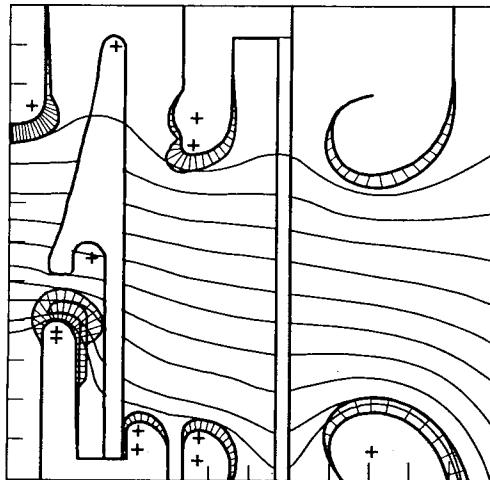


Рис.2

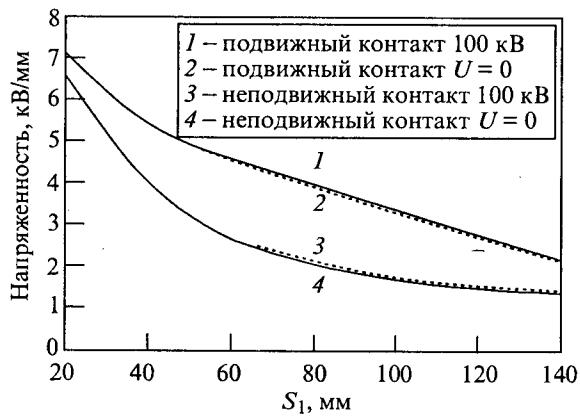


Рис.3

жено напряжение. Важно отметить, что напряженность на подвижном контакте в процессе размыкания контактов у корректно спроектированного В всегда выше. На рис.2 показана эпюра распределения напряженности по поверхности элементов ДУ при расстоянии между контактами $S_1 = 100$ мм. Видно, что максимум напряженности расположен на торце подвижного контакта.

Основными мерами, позволяющими уменьшить напряженность на ПК, являются:

- оптимизация зазора между фторопластовой накладкой и торцом ПК;
- оптимизация формы (выбор радиусов сопротяжения) торца ПК;
- изменение положения НК относительно его экрана при сохранении расстояния между контактами В в разомкнутом положении.

Выполнение этих мер оказывает также влияние и на параметры потока газа в процессе отключения.

В частности, геометрические размеры и расположение насадки 5 существенно влияют на параметры электрического поля и давления газа

вблизи ПК. Например, правильный выбор расстояния между торцом подвижного контакта и насадкой 5 может привести к снижению напряженности в этой области более чем на 25%, а также к увеличению до 20% давления газа у подвижного контакта по сравнению с давлением заполнения. При этом увеличенное давление поддерживается практически неизменным в течение всего времени движения контактов.

За счет изменения начального положения НК относительно его экрана можно добиться снижения напряженности на ПК в процессе отключения, например, таким образом, чтобы при $S_1 = 100$ мм напряженности на ПК и НК были одинаковы.

Однако можно показать, что в этом случае конструкция не обеспечивает нормированную электрическую прочность межконтактного промежутка В в разомкнутом состоянии. Поэтому даже при оптимизации конструкции ДУ напряженность на ПК в процессе размыкания контактов все равно остается выше, чем на НК на 20–25%.

Таким образом, в условиях одинаковой плотности газа во всём промежутке, т.е. при неподвижных контактах, расчёты электрического поля указывают на определяющую роль ПК в возникновении электрического пробоя.

При оценке вероятности электрического пробоя во время движения контактов необходимо учитывать отмеченную неравномерность в распределении плотности газа. Из представленного на рис.4 распределения давления газа в межконтактном промежутке при расстоянии между контактами 100 мм для разных значений радиальной координаты r (расстояния от оси ДУ) видно, что давление в межконтактном промежутке изменяется в 1,5–2 раза.

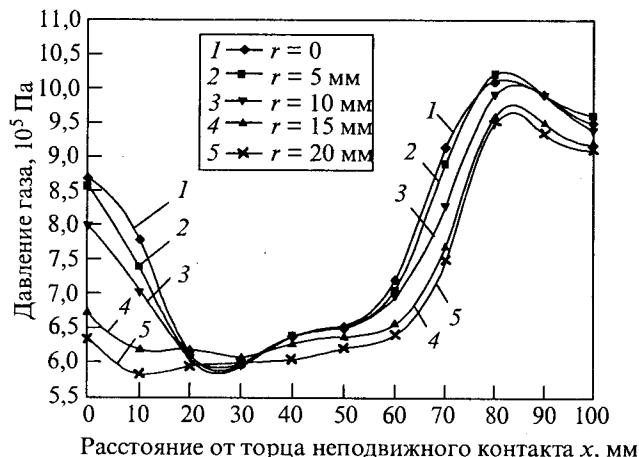


Рис.4

При этом если вблизи поверхности ПК давление практически не меняется (рис.5), то вблизи поверхности НК имеется область пониженного давления, практически совпадающая с областью повышенной напряженности (рис.6).

На рис.7 представлено распределение давления вблизи поверхности НК для разных расстояний S_1 между контактами В. Видно, что с увеличением расстояния между контактами давление вблизи более напряженной точки на НК падает в большей степени.

В качестве критерия возникновения или отсутствия пробоя межконтактного промежутка используем факт достижения или отсутствия на поверхности контактов точек с напряженностью, превышающей напряженность пробоя $E_{\text{пр}}$. Известно [2, 3], что напряженность пробоя связана с абсолютным давлением элегаза соотношением

$$E_{\text{пр}} = Ap^n, \quad (1)$$

где параметры A и n определяются главным образом состоянием поверхности электродов.

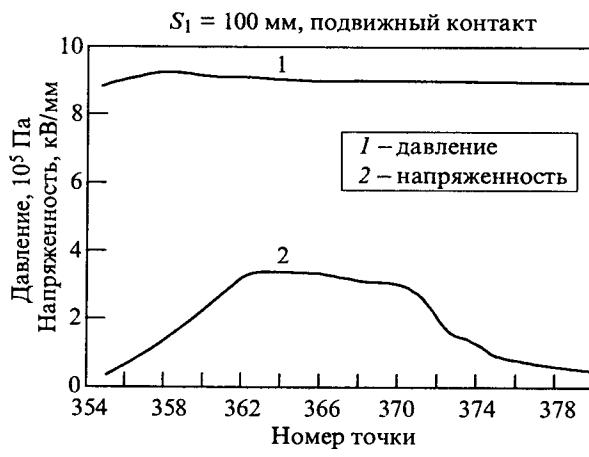


Рис.5

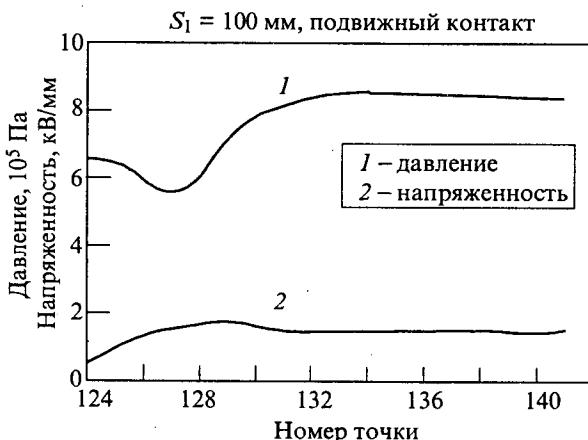


Рис.6

Анализ имеющихся данных позволяет указать следующие диапазоны для изменения параметров A и n :

$$5,6 < A < 6,9; 0,73 < n < 0,88 \quad (2)$$

при условии, что давление p задано в мегапаскалях, а напряженность $E_{\text{пр}}$ в киловольтах на миллиметр. При постоянной температуре газа в пределах ДУ (что практически точно выполняется при отключении емкостных токов) соотношение (1) позволяет записать для напряжения пробоя формулу

$$U_{\text{пр}} = B_1 \frac{p^n}{E_{\text{max}}},$$

где E_{max} — максимальная напряженность в рассматриваемой области при заданном соотношении потенциалов контактов (например, при описанной выше системе потенциалов a или b); B_1 — эмпирический коэффициент.

Отношение

$$\xi = \frac{U_{\text{пр}}}{B_1} = \frac{p^n}{E_{\text{max}}}$$

при этом становится критерием, позволяющим сопоставлять условия возникновения электроиниционных явлений и пробоя в различных точках дугогасительного устройства, в том чис-

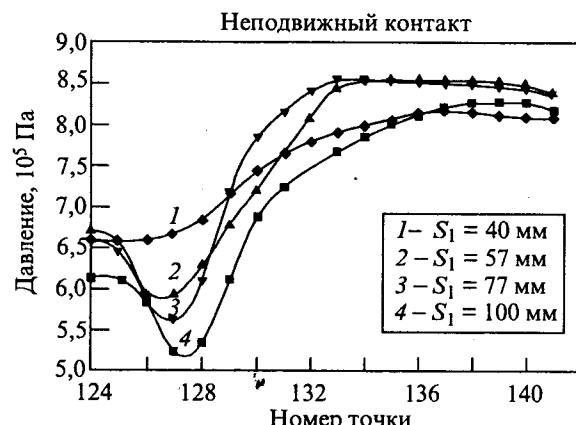


Рис.7



Рис.8

ле на поверхности неподвижного и подвижного контактов. Такое сопоставление выполнено применительно к системе, показанной на рис.3. Его результаты в виде графиков зависимостей критерия ξ от расстояния между контактами S_1 при различных системах потенциалов приведены на рис.8. Видно, что на поверхности НК численное значение критерия ξ , пропорционально напряжению пробоя в заданной области, неизменно выше, чем на поверхности ПК. Это подтверждает сделанный выше вывод об определяющем значении условий на поверхности ПК в ДУ с подвижным поршнем.

Для правильного понимания ситуации в ДУ во время движения контактов необходимо особо отметить то обстоятельство, что показатель степени n в выражении (1) всегда меньше единицы ($n < 1$). При этом условие равной электрической прочности в двух различных точках с давлениями p_1, p_2 и напряженностями E_1, E_2 имеет вид:

$$\frac{p_1^n}{E_1} = \frac{p_2^n}{E_2} \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{1/n}.$$

Таким образом, для того чтобы критерий ξ для НК снизился по крайней мере до значения ξ для ПК, соотношение между давлениями вблизи этих контактов в зоне наибольшей напряженности на их поверхности должно составлять не менее 1,3–1,4.

Отсюда можно сделать вывод, что при практическом проектировании ДУ необходимо тщательно следить за оптимизацией электрического поля в холодном неподвижном газе, имея в виду, что снижение напряженности на контактах эффективно компенсирует возможное снижение электрической прочности межконтактного промежутка из-за неравномерной плотности движущегося газа.

Несмотря на то, что известные опубликованные данные относительно зависимости (1) и числовых значений параметров A и n (2) относятся к неподвижному холодному газу, имеются основания считать их справедливыми и применительно к движущемуся газу. Экспериментальное определение электрической прочности межконтактного промежутка в процессе размыкания в условиях автогазового дутья, выполненные в ОАО "НИИВА", показало, что разница уровня электрической прочности по сравнению со случаем неподвижного газа не превышает статистического разброса получаемых данных. Этот результат позволяет значительно упростить процедуру оптимизации ДУ.

Всё сказанное относительно электрической прочности холодного газа при отключении емкостных токов остаётся качественно справедливым и при отключении токов КЗ, за исключением конкретных числовых значений параметров A и n в (1). Это означает, что имеющиеся возможности по управлению электрическим полем в критической области вблизи ПК (установка дополнительных экранов, изменение взаимного расположения электродов, и т.д.) необходимо использовать в первую очередь для достижения максимального эффекта при отключении токов КЗ. При этом приоритет получают те средства управления полем, действие которых не связано с изменением газодинамической ситуации в межконтактном промежутке. Например, конструкция на рис.1, a снабжена экранами 7 и 8, размещенными за пределами камерного цилиндра 9 и, таким образом, не оказывающими влияния на параметры потока газа. Выравнивание поля, создаваемое экранами 7 и 8 в промежутке между контактами, в равной степени обеспечивает как увеличение отключающей способности, так и возможность отключения емкостных токов. Накопленный опыт проектирования и разработки ряда ДУ показывает, что, как правило, при обеспечении нормированных условий по гашению дуги тока КЗ, выполняются также и условия по отключению емкостных токов.

Приведенные результаты расчетов и исследований были использованы при разработке ДУ ряда выключателей на напряжение от 330 до 800 кВ. Выключатели полностью прошли предварительные и типовые испытания на соответствие требованиям Стандарта МЭК 62271-100 в ОАО "НИИВА" и в зарубежных испытательных центрах KEMA (Голландия) и KERI (Корея).

Выводы

1. Отключающая способность выключателя с дугогасительным устройством на основе подвижного поршня при отключении емкостных токов определяется условиями работы газовой изоляции вблизи подвижного контакта.

2. Экспериментально выполненное сопоставление электрической прочности межконтактного промежутка в дугогасительном устройстве с неподвижными и движущимися контактами при отсутствии и наличии газового дутья показало совпадение результатов в пределах имеющегося статистического разброса.

Список литературы

1. Бортник И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. М.: Энергоатомиздат, 1988.

2. Mosh W., Haushild W. Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid. Berlin: VEB Verlag Technik, 1979.

3. Endo F., Sato M., Tsukysshi M. and others. Analytical prediction of transient breakdown characteristics of SF₆ gas circuit breakers // IEEE Transactions of Power Delivery. 1989. Vol.4, No. 3.

Берлин Борис Евгеньевич – заведующий сектором высоковольтной изоляции ОАО "НИИВА". Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1971 г. по специальности "Электрические машины и аппараты", инженер-электромеханик.

Вишневский Юрий Иосифович – генеральный директор ОАО "НИИВА". Окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова /Ленина/ в 1958 г. по специальности "Электрические станции, сети и системы", инженер-электрик. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию. Чл.-кор. РАЭН.

Пельц Александр Самуилович – зам. главного конструктора ОАО "НИИВА". В 1989 г. окончил Ленинградский политехнический институт по специальности "Электрические аппараты", инженер-электромеханик.

Тонконогов Евгений Николаевич – доцент кафедры "Электрические и электронные аппараты" Санкт-Петербургского ГПУ. В 1968 г. окончил Ленинградский политехнический институт. В 1973 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Ярмаркин Михаил Кириллович – доцент кафедры "Электрические и электронные аппараты" Санкт-Петербургского ГПУ. В 1973 г. окончил Ленинградский политехнический институт. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Комплектные распредел устройства с элегазовой изоляцией на сверхвысокие напряжения

БАБКИН И.В., БЕРЛИН Б.Е., ВИШНЕВСКИЙ Ю.И., ЛОПАЕВ В.Н., ТРЕТЬЯКОВ С.В.

Представлены результаты разработок института ОАО "НИИВА" в области КРУЭ на напряжения до 800 кВ. Общий спектр разработок, включающий выключатели, в том числе с шунтирующими и предвключаемыми резисторами, быстродействующие заземлители, разъединители, в том числе с предвключаемыми резисторами, и ряд других аппаратов позволяет создавать КРУЭ практически для любых схем подстанций, применяемых не только у нас в стране, но и за рубежом.

Отечественной промышленностью более 30 лет назад были разработаны и освоены в производстве все виды оборудования для сверхвысоких классов напряжения: еще в 1967 г. была включена под напряжение опытно-промышленная электропередача 750 кВ Конаково–Москва. Таким образом, основное подстанционное оборудование находится в эксплуатации подчас более 30 лет. Это показатель и качество оборудования и наступившей по известным причинам бедности энергосистем.

Вместе с тем за прошедшее время в области коммутационной аппаратуры произошла революция, вызванная широким применением в качестве изолирующей и дугогасящей среды элегаза – шестифтористой серы. Это привело к резкому сокращению габаритов, повышению надежности коммутационного оборудования, появлению и широкому применению комплектных распредел устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ). В НИИВА, прежде входившем в

The results of development work of JSC "NIIVA" in the field of GIS rated for voltages up to 800 kV are presented in the article. The general development spectrum, covering the circuit breakers, including with shunting and closing resistors, high speed grounding switches, disconnecting switches, including with closing resistors, and number of other apparatus allows to create GIS practically for any layouts of substations applied not only in our country, but abroad also.

ПО "Электроаппарат", к концу 80-х годов была закончена разработка серии КРУЭ на напряжение от 110 до 500 кВ. Необходимо подчеркнуть, что данные разработки представляют собой не исследовательские макеты, а законченные, технологически подготовленные изделия, прошедшие полный комплекс квалификационных испытаний. Однако применение нашли только КРУЭ на напряжение 110 и 220 кВ и в основном в Мосэнерго (свыше 20 подстанций). Отсутствие достаточного количества заказов тяжело сказалось на разработчиках и изготовителях элегазовой аппаратуры. Для НИИВА выходом явилось сотрудничество с зарубежными партнерами, хотя связи с отечественными производителями были и остаются приоритетной областью деятельности.

В результате сотрудничества НИИВА с корейской фирмой "Hyundai Heavy Industries Co" (HHI) были созданы КРУЭ на 362 и 800 кВ, прошедшие полный комплекс типовых испытаний в крупнейших зарубежных испытательных цен-

трах KEMA (Голландия) и KERI (Корея), сейчас заканчивается разработка КРУЭ 550 кВ на базе одноразрывного выключателя. К моменту публикации этой статьи в Корее встанут под напряжение подстанции 362 и 800 кВ на основе КРУЭ российской разработки.

Основные технические характеристики КРУЭ приведены в таблице.

На рис.1–3 представлены фрагменты схем полюсов КРУЭ на разные напряжения. В состав КРУЭ входят как традиционные для нашей энергетики компоненты: выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения, ограничители перенапряжений, так и новые: быстродействующие заземлители, разъединители с ограниченной коммутационной спо-

| Номинальные характеристики | КРУЭ 362 | КРУЭ 500 | КРУЭ 800 |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Уровень изоляции, кВ: | | | |
| – грозовой импульс (на землю / между контактами) | 1175/1175+200 | 1550/1550+315 | 2250/2250+457 |
| – коммутационный импульс (на землю/ между контактами) | 950/800+245 | 1175/900+450 | 1425/1100+653 |
| – 50 Гц (на землю / между контактами) | 450/520 | 620/800 | 830/1100 |
| Номинальный ток, А | 8000 | 4000 | 8000 |
| Номинальный ток отключения, кА | 63 | 50 | 50 |
| Количество разрывов на полюс в выключателе | 2 | 1 и 2 | 2 |
| Ток стойкости, кА _{хс} | 63×2 | 50×3 | 50×2 |
| Частота, Гц | 50/60 | 50/60 | 50/60 |

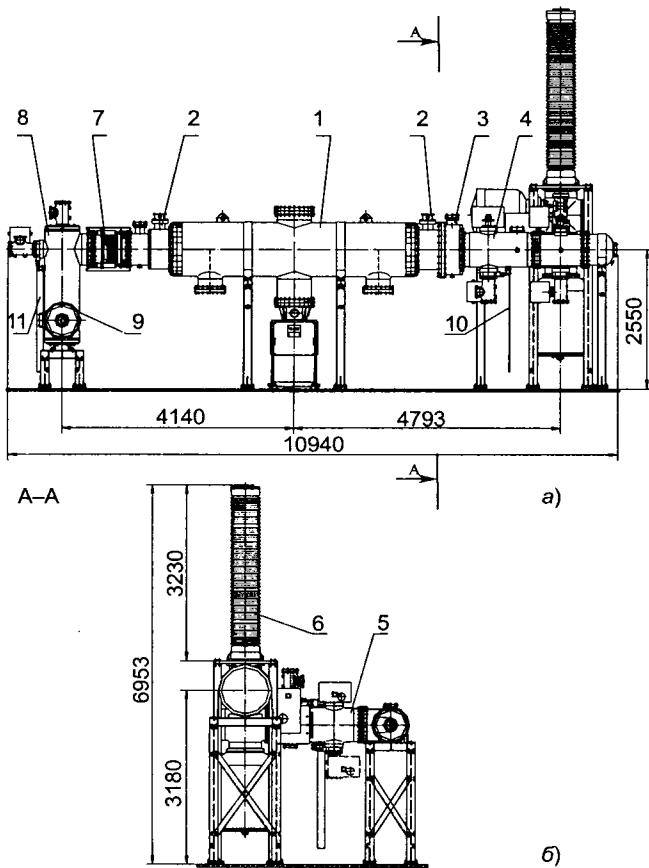


Рис.1. Фрагмент полюса КРУЭ 362:

а – вид спереди; б – вид слева по А–А; 1 – полюс выключателя; 2 – трансформатор тока; 3 – блок поперечного демонтажа; 4 – секционный разъединитель с заземлителем; 5 – линейный разъединитель с заземлителем; 6 – ввод "воздух–элегаз"; 7 – сильфонный компенсатор; 8 – шинный разъединитель с заземлителем; 9 – сборная шина; 10, 11 – шины заземления

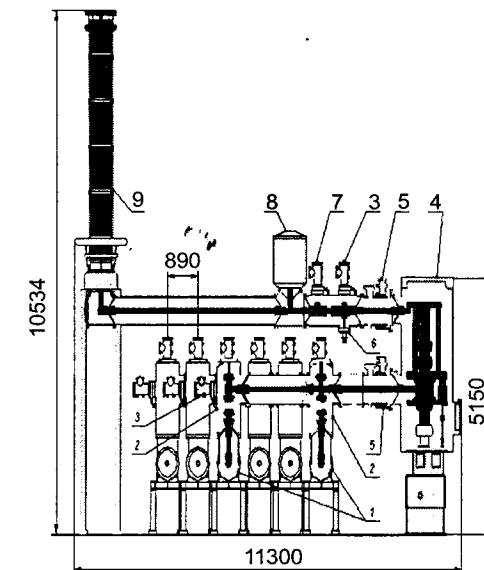


Рис.2. КРУЭ на напряжение 500 кВ (вид слева):

1 – сборная шина; 2 – шинный разъединитель; 3 – заземлитель; 4 – полюс выключателя; 5 – трансформатор тока; 6 – линейный разъединитель; 7 – быстродействующий заземлитель; 8 – трансформатор напряжения; 9 – ввод "воздух–элегаз"

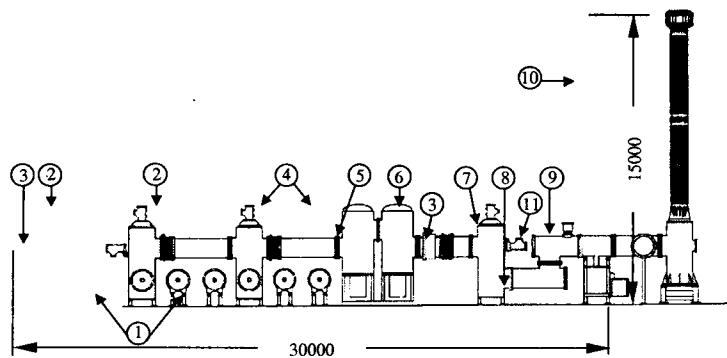


Рис.3. КРУЭ на напряжение 800 кВ (структурная схема):
 1 – сборные шины; 2 – шинный разъединитель; 3 – заземлитель для технического обслуживания; 4 – выключатель; 5 – трансформатор тока; 6 – линейный разъединитель; 7 – заземлитель; 8 – быстродействующий заземлитель; 9 – трансформатор напряжения; 10 – ввод "воздух–элегаз"; 11 – изоляционная распорка

Выключатели

В основе конструкции всех выключателей лежит автокомпрессионное дугогасительное устройство. В выключателях используются гидравлические приводы различных модификаций. Двухразрывные выключатели (рис.4) на 330 и 500 кВ имеют горизонтальную компоновку с центральным расположением привода. В одноразрывном выключателе 500 кВ использован принцип двойного хода контактов.

Выключатель 800 кВ (рис.5) имеет два разрыва, каждый расположен в отдельном вертикальном баке и управляется отдельным гидроприводом. Это позволило значительно сократить линейные габариты КРУЭ 800. Все представленные выключатели могут иметь встроенные предвключаемые резисторы для снижения ком-

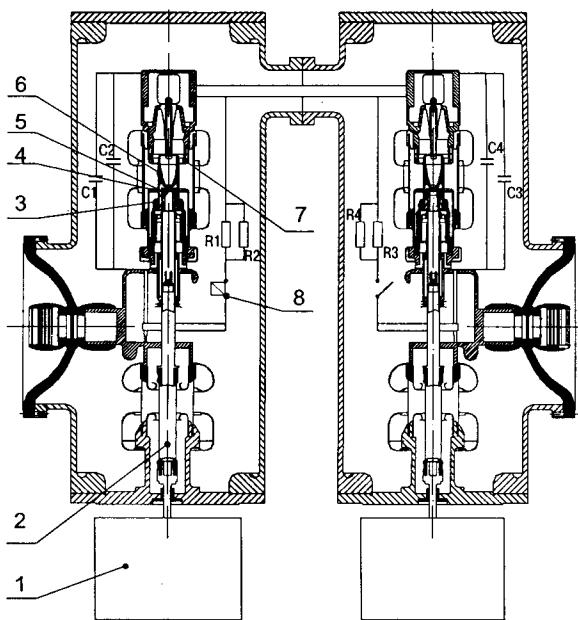


Рис.5. Выключатель:

1 – гидропривод; 2 – тяга; 3 – главный подвижный контакт; 4 – дугогасительный подвижный контакт; 5, 6 – сопла; 7 – неподвижный контакт; 8 – контакты предвключаемого резистора; R1, R2, R3, R4 – предвключаемые резисторы; C1, C2, C3, C4 – делительные конденсаторы

мутационных перенапряжений. Особенностью, данных резисторов является то, что при операциях включения контакты резисторов должны включаться первыми, а при операции отключения эти же контакты должны отключаться первыми, и к моменту погасания дуги на дугогасительных контактах они должны находиться на расстоянии, при котором выдерживается переходное восстановливающееся напряжение, возникающее на дугогасительных контактах. Иногда для решения задачи рассогласования движения двух пар контактов (резисторов и дугогасительных) используются два независимых привода [1]. В представленных конструкциях две пары контактов приводятся в движение одним приводом, а рассогласование достигается применением в резисторных контактах пружинно-пневматического устройства, встраиваемого в один из торцевых контактов: при операции отключения подпружиненный контакт возвращается в исходное положение с заданной задержкой во времени, чем и достигается необходимая электрическая прочность промежутка.

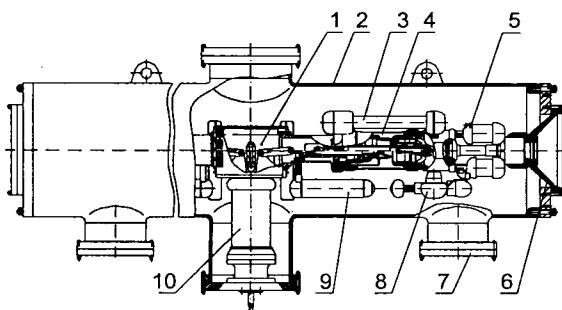


Рис.4. Выключатель ВГГ-362:

1 – передаточный механизм; 2 – резервуар; 3 – делительный конденсатор; 4 – гасительная камера; 5 – блок предвключаемых резисторов; 6 – изолятор; 7 – крышка с фильтром; 8 – неподвижный контакт предвключаемых резисторов; 9 – подвижный контакт предвключаемых резисторов; 10 – опорный изолятор

Разъединители

Разъединители разных модификаций представлены на рис.6, 7. Они могут использоваться

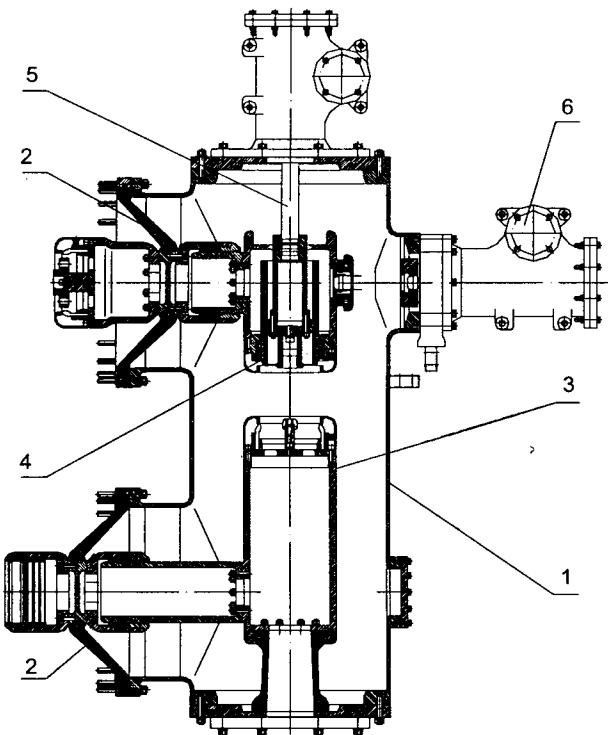


Рис.6. Разъединитель шинный на 362 кВ:
1 – резервуар; 2 – изолятор; 3 – неподвижный контакт; 4 – подвижный контакт; 5 – тяга; 6 – заземлитель

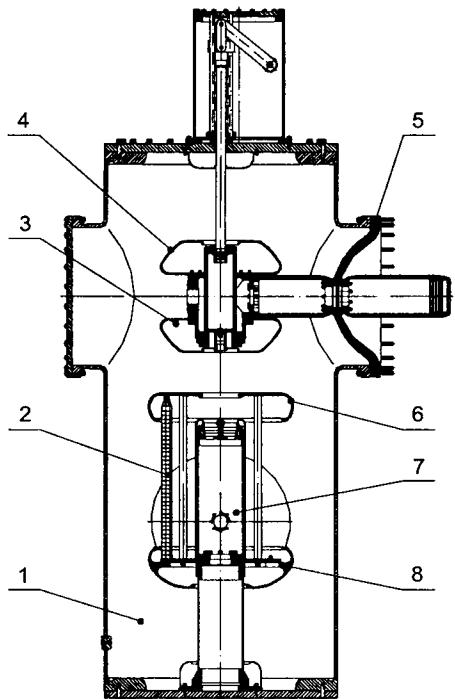


Рис.7. Разъединитель:
1 – резервуар; 2 – блок резисторов; 3 – подвижный контакт; 4, 6, 8 – экраны; 5 – изоляторы; 7 – неподвижный контакт

как с моторными, так и с пружинно-моторными приводами. Специальная форма контактов и экранов позволила получить повышенную коммутационную способность по сравнению с требованиями стандарта МЭК 61128: коммутируемый ток 8000 А при напряжении 300 В в отличие от стандартных 1600 А при 40 В. Разъединитель 800 кВ имеет предвключаемые резисторы двустороннего действия, что практически полностью снимает вопрос перенапряжений при коммутации холостых участков линий. На меньшие напряжения разъединители не имеют предвключаемых резисторов, так как уровень коммутационных перенапряжений не представляет опасности для изоляции КРУЭ.

Заземлители

Заземлители – разнообразные коммутационные аппараты, в функции которых входит преднамеренное заземление участков КРУЭ для выполнения ремонтных работ – заземлители безопасности (рис.6), локализация места КЗ для устранения открытой дуги и др. Заземлители не предназначены для длительного пропускания тока, но должны выдерживать в замкнутом состоянии ток КЗ. Поэтому контактная система, как правило, не имеет главных контактов, но обладает повышенной стойкостью к токам КЗ. Кроме того, заземлители должны обладать коммутационной способностью, по крайней мере достаточной для коммутации наведенных токов.

Особые повышенные требования были предъявлены к быстродействующему заземлителю (БДЗ) 800 кВ. Принцип действия аппарата основан на следующем. При однофазном КЗ в линиях УВН обычно выключатели с двух сторон поврежденной фазы отключают ток КЗ. После отключения тока в месте КЗ протекает ток вторичной дуги, причиной которого является электростатическая наводка от "здоровых" фаз. Когда взаимное влияние между фазами велико, могут создаться условия, при которых вторичная дуга не погаснет за время бестоковой паузы до повторного включения выключателей. Одним из способов устранения вторичной дуги является использование БДЗ, которые создают условия для погасания вторичной дуги путем заземления поврежденной фазы с двух сторон после гашения дуги КЗ. После погасания вторичной дуги заземлители отключают токи наводки: первый по времени гасит электромагнитный ток наводки, а второй – электростатический. Вслед за операцией отключения БДЗ токов наводки создаются условия для включения вык-

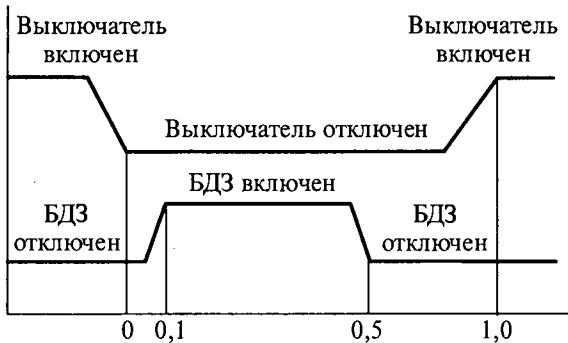


Рис.8

лючателей на концах поврежденной фазы. Операции включения и отключения БДЗ должны выполнить в течение бестоковой паузы. Принцип работы поясняется на рис.8.

Технические требования к БДЗ

Коммутация емкостного тока:

| | |
|----------------------|-----|
| ток, А | 750 |
| восстанавливающееся | |
| напряжение, кВ | 700 |

Коммутация индуктивного тока:

| | |
|----------------------|------|
| ток, А | 8000 |
| восстанавливающееся | |
| напряжение, кВ | 700 |

Расчетным путем было установлено, что, если в процессе отключения наведенного тока, вызванного однофазным КЗ, через полупериод после начала отключения по каким-либо причинам возникнет КЗ во второй фазе, то могут создаться условия, при которых в токе наводки уменьшится переменная составляющая и результирующая кривая не будет иметь нулевого значения в течение 80 мс. Как известно, для ультравысоких напряжений процент однофазных КЗ приближается к 100%, поэтому вероятность такого события близка к нулю, но этот режим был введен в технические требования и стал одним из основных требований, определяющих конструкцию аппарата.

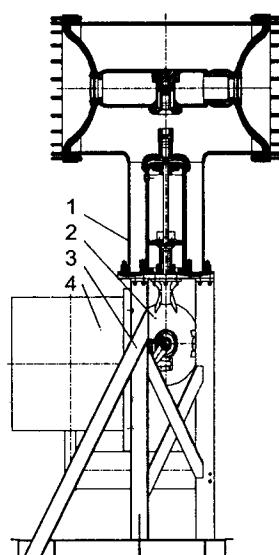


Рис.9. Конструкция БДЗ:
1 – гасительное устройство; 2 – редуктор; 3 – металлоконструкция; 4 – привод

Таким образом, аппарат должен отключать токи до 8 кА, которые могут не иметь нулевого значения в течение 80 мс. Тем самым задано максимальное время дуги, т.е. аппарат должен иметь достаточную коммутационную способность через 80 мс после начала возникновения дуги между контактами. Для выполнения данного требования было разработано одноразрывное автоматическое дугогасительное устройство, имеющее в конце хода подвижных частей большой компрессионный объем, достаточный для того, чтобы через 80 мс после начала дуги аппарат мог погасить 8 кА при скорости нарастания ПВН 1,52 кВ/мкс и амплитуде 700 кВ. Конструкция БДЗ приведена на рис.9.

Разработка и испытания

К настоящему времени в институте созданы пакеты программ, позволяющие рассчитывать основные характеристики аппаратов до стадии создания образцов. Можно констатировать, что применительно к изоляции аппаратов используемое нами программное обеспечение позволяет получать высокодостоверные результаты. Поэтому оптимизация изоляции конструкций проводится преимущественно расчетным путем. То же в большой степени относится и к газодинамическим расчетам.

При разработке КРУЭ на сверхвысокие напряжения в институте были созданы и испытаны полномасштабные макеты всех аппаратов, подтвердившие соответствие заданным требованиям. Для обеспечения испытаний макетов была проведена модернизация испытательных установок. Были разработаны и проверены в работе новые синтетические схемы. Так, была введена в эксплуатацию трехконтурная схема (рис.10) [2].

В этой схеме возможно формирование кривой переходного восстанавливающегося напря-

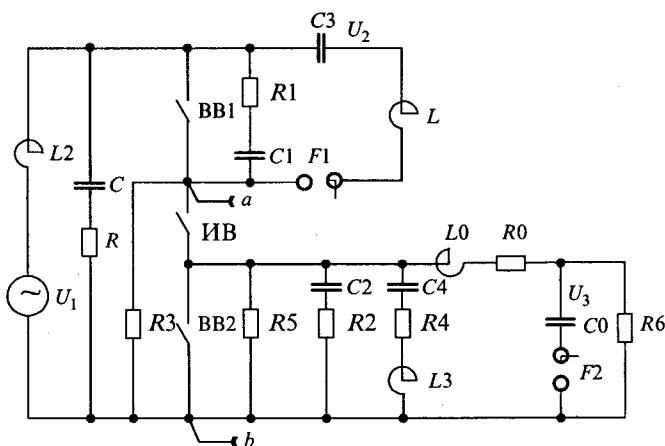


Рис.10

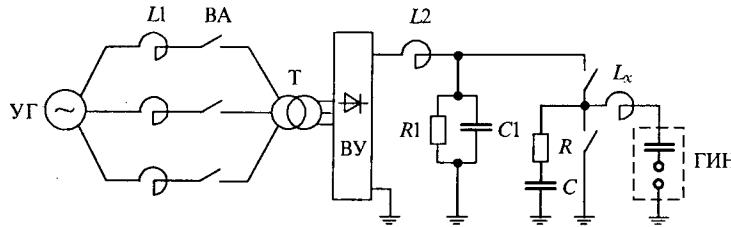


Рис.11

жения с амплитудой свыше 1000 кВ, что позволило довести коммутационные испытания выключателя с напряжением на разрыв 500 кВ. Коммутационные испытания БДЗ проводились с помощью установки, в которой источником тока была мощная выпрямительная установка, что позволило получить униполярную волну тока длительностью до 150 мс и амплитудой до 10 кА (рис.11). После завершения предварительных испытаний в НИИВА фирма ННІ изгото- вила промышленные образцы, которые успеш- но прошли типовые испытания в испытательных центрах КЕМА (Голландия) и KERI (Корея).

Список литературы

1. Yamagata Y., Kobayashi A., Yoshizumi T., Tsubaki T. Development of 1100 kV GIS-gas circuit breakers, disconnectors and high-speed grounding switches. Доклад 13-304 на сессии СИГРЭ 1966 г.

2. Трехконтурная синтетическая схема для испытаний выключателей // Тр. V симпозиума "Электротехника – 2010". 1999. Докл. 2–65.

Бабкин Игорь Владимирович – руководитель испытательного центра ОАО "НИИВА". В 1976 г. окончил Ленинградский политехнический институт. В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Берлин Борис Евгеньевич – заведующий сектором высоковольтной изоляции ОАО "НИИВА". В 1971 г. окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности "Электрические машины и аппараты", инженер-электромеханик.

Вишневский Юрий Иосифович – генеральный директор ОАО "НИИВА". В 1958 г. окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова /Ленина/ по специальности "Электрические станции, сети и системы", инженер-электрик. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию. Чл.-кор. РАЭН.

Лопаев Вениамин Николаевич – заместитель главного конструктора ОАО "НИИВА". В 1965 г. окончил Ленинградский механический институт по специальности "Автоматические установки", инженер-механик.

Третьяков Станислав Васильевич – главный конструктор, заместитель генерального директора ОАО "НИИВА". В 1968 г. окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова /Ленина/ по специальности "Электрические машины и аппараты", инженер-электромеханик.

Элегазовые выключатели для КРУЭ на 170 и 362 кВ

ЕГОРОВ В.Г., КОЛОБАНОВА Н.Н., ТОРОПЧИН Ю.В., ЧЕМЕРИС В.С.

Описаны элегазовые выключатели для КРУЭ на 170 и 362 кВ, разработанные в ВЭИ им. Ленина и прошедшие испытания в KERI (Республика Корея).

В ВЭИ им. В.И.Ленина были разработаны выключатели для КРУЭ на напряжение 170 кВ с током отключения 31,5 и 50 кА с размещением всех трех фаз в одной оболочке и на напряжение 362 кВ в пофазной компоновке – одноразрывный выключатель с током отключения 40 кА и двухразрывный выключатель на ток отключения 63 кА (для промышленной частоты 60 Гц).

Основные параметры разработанных выключателей соответствуют требованиям МЭК.

Разработка принципиальной конструкции выключателя содержала:

- расчеты и разработку дугогасительного устройства, включая расчет отключающей способ-

ности в режиме 90% $I_{o,nom}$, расчет газодинамических характеристик газового потока, расчет электрической прочности при отключении емкостного тока холостой линии;

- расчет изоляции выключателя, включая расчет изоляции межконтактного промежутка, расчет изоляции относительно корпуса выключателей, расчет опорной изоляции выключателей;

- тепловой расчет элементов выключателя при длительном протекании номинального тока и сквозного тока КЗ;

- расчет механической прочности элементов выключателя, включая расчет бака на механическую прочность с учетом возможного прожога оболочки;

| Наименование параметров, ед. | Значения параметров | | | | | |
|--|-------------------------|------|-------------|------|--|--|
| Номинальное (наибольшее рабочее) напряжение, кВ | 170 | | 362 | | | |
| Номинальная частота, Гц | 60 | | | | | |
| Номинальный ток, А | 1250–2000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, 1 мин, кВ _{действ} : | | | | | | |
| – по отношению к земле | 325 | | 450 | | | |
| – между разомкнутыми контактами одного и того же полюса выключателя | | | 520 | | | |
| Выдерживаемое напряжение грозового импульса 1,2 / 50 мкс, кВ _{ампл} : | | | | | | |
| – по отношению к земле | 750 | | 1175 | | | |
| – между разомкнутыми контактами одного и того же полюса выключателя | | | 1175 (+205) | | | |
| Выдерживаемое напряжение коммутационного импульса 250/2500 мкс, кВ _{ампл} : | | | | | | |
| – по отношению к земле | | | 950 | | | |
| – между фазами | | | 1450 | | | |
| – между разомкнутыми контактами одного и того же полюса выключателя | | | 800 (+295) | | | |
| Нормированные параметры сквозного тока КЗ, кА | | | | | | |
| – действующее значение периодической составляющей | 31,5 | 50 | 40 | 63 | | |
| – наибольший пик | 80 | 125 | 100 | 160 | | |
| – среднеквадратичное значение тока за время его протекания 1 с | 31,5 | 50 | 40 | 63 | | |
| Номинальный ток отключения, кА | 31,5 | 50 | 40 | 63 | | |
| Нормированное содержание апериодической составляющей, % | 55 | | | | | |
| Полное время отключения, не более, мс | 50 | | | | | |
| Ток включения (наибольший пик), кА | 80 | 125 | 100 | 160 | | |
| Полное время включения, не более, мс | 80 | | | | | |
| Число дугогасительных разрывов на полюс | 1 | | 1 | | | |
| Давление элегаза (изб.) при +20°C, МПа: | | | | | | |
| – номинальное при заполнении | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | | |
| – сигнализации о понижении | 0,45 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | | |
| – блокировка оперирования | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | |
| Утечка элегаза от массы, не более, % в год | 1,0 | | | | | |
| Привод | Гидравлический | | | | | |
| Управление | Трехфазное | | Пофазное | | | |
| Нормированные коммутационные циклы | О- $t_{бт}$ -ВО-180с-ВО | | | | | |
| Механический ресурс – число операций ВО | 5000 | | | | | |
| Диапазон рабочих температур, °C | –25 ± +40 | | | | | |

– разработку конструкции выключателя и его узлов.

Основным элементом выключателя, который должен обеспечивать его успешную работу во всех предписанных стандартами коммутационных режимах, является дугогасительное устройство (ДУ). Для выключателей высокого и сверхвысокого напряжения с большими значениями

отключаемых токов обычно определяющими являются:

– отключение неудаленного тока КЗ 90% $I_{o,ном}$, когда имеются высокие значения dU/dt и di/dt , а возможное повторное зажигание определяется балансом энергии, выделяемой и отводимой в дуговом промежутке (условия коммутации резко усложняются с ростом отключаемо-

го тока, особенно для одноразрывных выключателей);

– режим отключения тока, равного номинальному току отключения на выводах выключателя, когда при наличии большого количества последугового горячего газа в межконтактном промежутке возможен его электрический пробой при напряжениях, близких к амплитуде восстанавливавшегося напряжения (условия коммутации усложняются с ростом класса напряжения и отключающего тока);

– режим отключения емкостного тока ненагруженной воздушной линии, когда амплитуда восстанавливавшегося напряжения достигает максимальных значений (условия коммутации сильно усложняются с ростом напряжения на разрыв).

Основой проведенной разработки стал имеющийся в ВЭИ им. В.И.Ленина обширный опыт разработок элегазовых выключателей высокого напряжения [1, 2], в том числе широкий комплекс теоретических и экспериментальных исследований, связанных с созданием ДУ на высокие и сверхвысокие напряжения: газовых потоков в ДУ с применением созданных расчетных программ газодинамических процессов, влияния конфигурации электрического поля в межконтактном промежутке (МКП) и потоков элегаза на электрическую прочность последугового промежутка ДУ, коммутационной износстойкости электродных и изоляционных материалов, электрических характеристик материалов сопел. Для автокомпрессионных ДУ были изучены зависимость отключающей способности от характеристик компрессионного устройства, эффекта закупорки сопла, взаимовлияние тяговых характеристик гидравлического привода и компрессионного устройства.

Одной из важнейших характеристик, определяющих отключающую способность газовых выключателей, является давление дугогасительной среды. При разработке выключателя важно создать такие значения давления, при которых в условиях отключения неудаленного КЗ были бы обеспечены гашение дуги в одном из прохождений отключающего тока через нуль и достаточно высокая скорость нарастания электрической прочности в процессе восстановления напряжения.

На базе используемой методики расчета динамики давления газа в коммутационном процессе [3] для всей разрабатываемой гаммы выключателей были проведены оценки и оптимизация таких основных конструктивных факторов

дугогасительных устройств, как давление газа, заполняющего аппарат, основные геометрические размеры ДУ (диаметр и длина компрессионного цилиндра, ход поршня, диаметр горловин сопл и моменты их открытия), значения массы подвижных частей, силовые характеристики привода и передаточного механизма, параметры демпфирующего устройства на участке торможения в конце хода.

Математическое моделирование восстанавливавшейся электрической прочности МКП [4] предусматривает совместный расчет изменяющегося в процессе расхождения контактов электростатического (поскольку для характерных последуговых времен, больше 10^{-4} с, поляризация плазмы в МКП уже практически отсутствует) поля и расчет эволюции газодинамических течений (полей скорости газа, его плотности или давления, а также температуры) в процессе расхождения контактов, основанный на численном решении уравнений двумерной нестационарной газовой динамики. Так как максимальное сечение дугового столба существенно меньше горловины сопла, влиянием дуги в этом режиме можно пренебречь.

В результате расчетов изменения электрических и газодинамических полей в МКП получены разрядные характеристики ДУ в зависимости от времени и хода системы подвижных контактов. Это позволило оценить влияние и сделать обоснованный выбор геометрии ДУ – формы и размеров сопл, формы и протяженности выхлопного тракта, конфигурации электродов, учесть эффекты неоднородного газового течения (в частности местные понижения давления у поверхности неподвижного дугоприемного контакта после выхода его из горловины сопла, связанные с образованием околозвуковых и сверхзвуковых зон в потоке).

Расчет конструктивных параметров оболочек выключателей, как и других элементов КРУЭ, учитывал механические и тепловые воздействия давления газа, тока и возможной внутренней аварийной дуги. Выбор стальной общей оболочки для всех элементов трехфазного КРУЭ на номинальное напряжение 170 кВ обусловлен как экономическими, так и техническими соображениями. Экономические аспекты определялись соотношением цен алюминиевых сплавов и стального проката, снижением материоемкости и трудозатрат по сравнению с пофазной конструкцией КРУЭ. Решение по выбору конструкции с общей оболочкой подкреплялось технически: сокращалось количество уплотнений и

повышалась надежность герметизации КРУЭ в целом, упрощались конструктивные решения по управлению коммутационными аппаратами от одного приводного механизма.

Применение стали для оболочек позволило использовать универсальные технологические приемы для изготовления корпусных деталей элементов КРУЭ, получить более качественную металлическую поверхность в узлах уплотнений, упростить сборку и транспортировку ячейки. Исполнение КРУЭ на номинальные токи до 2000 А позволило относительно простыми мерами ограничить температуры нагрева стальных оболочек и внутренних элементов в пределах нормируемых стандартами значений.

На рис.1 представлена фотография трехполюсной линейной ячейки КРУЭ с одной системой сборных шин на номинальное напряжение 170 кВ, номинальный ток 2000 А с выключателем с номинальным током отключения 31,5 кА (на переднем плане). Для связи с внешней электрической цепью в ячейке используются вводы "воздух–элегаз" с фарфоровыми покрышками.

Расположение выключателей в ячейках – вертикальное. Конструкция выключателей 170 кВ с номинальными токами отключения 31,5 кА и 50 кА – идентична (рис.2). Все три полюса с дугогасительными камерами 3 устанавливаются на основании резервуара (бака) 1 выключателя. В качестве опорной изоляции 6 и изоляции дугогасительной камеры используются цилиндры из полимерного материала. ДУ автокомпрессионного типа. Гашение дуги происходит в результате воздействия на нее потока сжатого элегаза, создаваемого связанным с подвижными кон-

тактами поршневым устройством. В выключателе с номинальным током отключения 50 кА дополнительно применен шунтирующий конденсатор. Соединение выключателей со смежными элементами ячейки осуществляется через герметичные изоляционные распорки (вводы "элегаз–элегаз") 5, которые устанавливаются в люках резервуара выключателя. Проходные токоведущие части вводов "элегаз–элегаз" с розеточными контактами 4 соединяются с внутренней стороны с неподвижными контактами дугогасительных устройств полюсов (токопроводами 2), а с внешней стороны – с токоведущими частями смежных с выключателем трансформаторов тока ячейки КРУЭ.

Для поглощения влаги и продуктов разложения элегаза в герметичном газовом объеме 11 в заглушенном патрубке с противоположной от тоководов стороне бака устанавливается фильтр-поглотитель 10. Управление выключателем осуществляется гидроприводом 7 конструкции ВНИИЭФ (г.Саров). Привод размещается в своем шкафу управления 8 внутри жесткой опорной конструкции для выключателя. Вся конструкция выключателя с гидроприводом монтируется на общем для элементов КРУ основании (раме) 9.

Передача движения от гидропривода к выключателю осуществляется штоком. Внутри выключателя шток через траверсу передает движение подвижным частям полюсов. Подвижные части дугогасительных устройств полюсов связаны с траверсой изоляционными полимерными тягами. Собственные времена выключателей при операции отключения составляют 25 мс, при операции включения – 80 мс. Номинальное давление в гидроприводе – 220 кг/см².

Выключатели на напряжение 170 кВ и номинальные токи отключения 31,5 и 50 кА прошли тепловые, механические, электрические и коммутационные испытания. Испытания выключателей по определению электрической прочности изоляции и на нагрев при длительном протекании номинального тока проводились в составе ячейки КРУЭ, испытания на механическую износостойкость и коммутационную способность – в автономном режиме, отдельно от других элементов ячейки.

При испытании электрической прочности изоляции значения выдерживаемых испытательных напряжений соответствовали требованиям Публикаций МЭК 60517 и 60694. Тепловые испытания проведены на ячейке, собранной в варианте токоведущей системы номинального

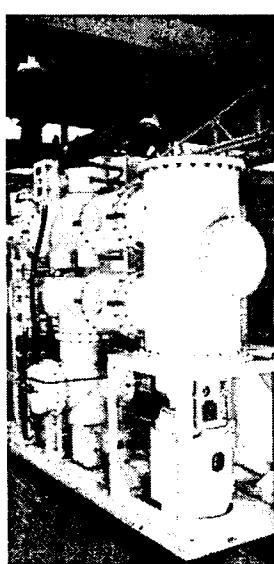


Рис.1. Ячейка КРУЭ 170 кВ

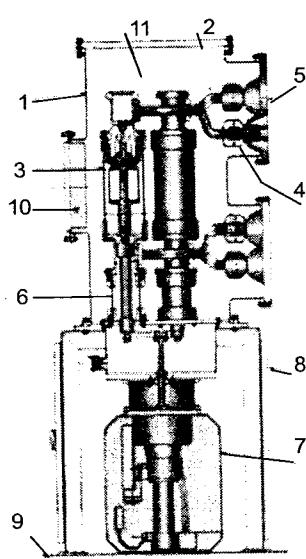


Рис. 2. Выключатель КРУЭ 170 кВ, 31,5 кА

тока 2000 А. Температуры перегревов на токоведущих элементах и оболочках элементов ячейки находились в пределах допустимых значений, также нормируемых МЭК 60694 и 60517.

Испытания на механическую износостойкость проводились путем многократного выполнения выключателем операций включение–отключение. В процессе проведения испытаний проверялись скоростные и временные характеристики выключателя, работа электромагнитов включения и отключения привода, утечки в системе питания гидравлической жидкостью привода и работоспособность его насоса. Наработка операций ВО проводилась в режиме: 100 операций ВО – пауза – 100 операций ВО. Без повреждений выключателем выполнено свыше 7700 операций ВО.

Коммутационные испытания выключателей проводились в испытательном центре KERI (Южная Корея). Выключатели прошли основные режимы испытаний, регламентируемые требованиями МЭК: отключение неудаленных КЗ при токах $0,9 I_{o.\text{ном}}$ и $0,75 I_{o.\text{ном}}$, отключение тока КЗ при рассогласовании фаз, отключение 10, 30, 60 и $100\% I_{o.\text{ном}}$, в том числе в сложных циклах и при апериодической составляющей с $\beta = 55\%$, отключение емкостных токов. Для испытаний выключатели были собраны с вводами "воздух–элегаз" с обеих сторон. Аппараты испытывались с применением синтетических схем проведения опыта при двухпараметрическом процессе восстановления напряжения. Испытания при отключении неудаленных КЗ и при рассогласовании фаз проведены в однофазном режиме, остальные испытания – в трехфазном режиме. На рис.3 представлена осциллограмма с электрической разверткой процесса отключения выключателем трехфазного КЗ при $100\% I_{o.\text{ном}} = 31,5$ кА. При испытаниях в цикле ВО и том же токе амплитуда тока достигала 104 кА (нормируемое значение 80 кА).

Рис.4 иллюстрирует процесс отключения неудаленного КЗ ($90\% I_{o.\text{ном}} = 50$ кА). На рис.4,а приведена осциллограмма с электрической разверткой (400 мкс на деление сетки), где показаны, соответственно, кривые восстанавливающегося напряжения, суммарного отключаемого тока перед нулем тока и высокочастотного тока наложения синтетической схемы. На рис.4,б представлена регистрация на электронном осциллографе посленулевых колебаний на кривой восстанавливающегося напряжения (развертка 10 мкс/дел.).

Положительные результаты испытаний подтвердили работоспособность разработанной

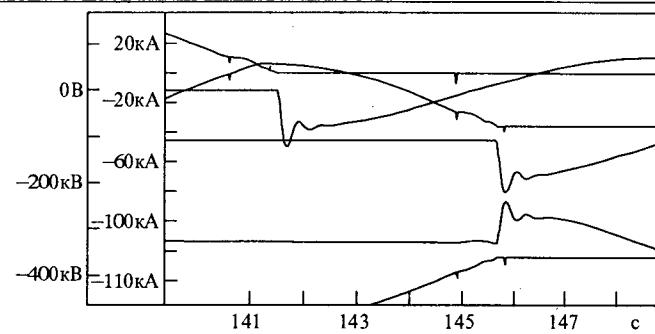


Рис.3. Осциллограмма отключения трехфазного тока КЗ на выводах (100% $I_{o.\text{ном}}$) выключателем 170 кВ, 31,5 кА

конструкции выключателей и КРУЭ на 170 кВ и стали базой для разработки КРУЭ на 362 кВ.

При разработке одноразрывного выключателя на 362 кВ и ток отключения 40 кА определяющими коммутационными режимами наряду с отключением неудаленного КЗ тока $90\% I_{o.\text{ном}}$, является обеспечение необходимой электрической прочности МКП в режимах отключения холостой линии и $100\% I_{o.\text{ном}}$.

В режиме отключения тока ненагруженной воздушной линии МКП в процессе отключения небольшого емкостного тока подвергается воздействию наибольшего в сравнении с другими

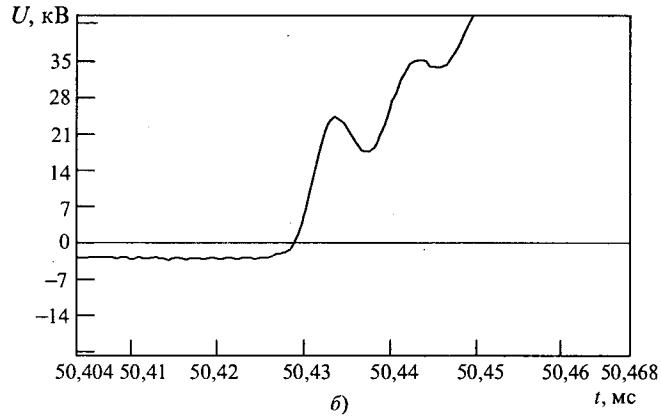
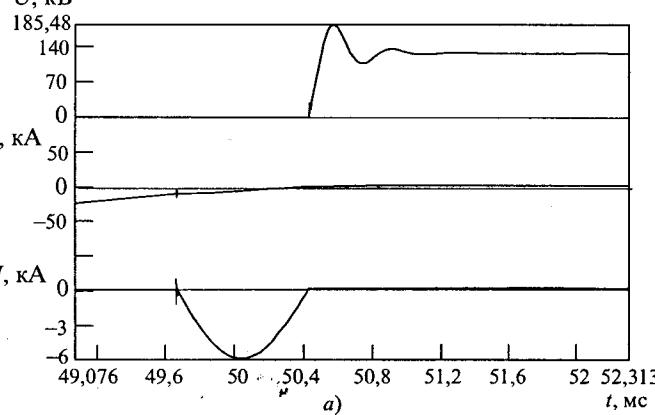


Рис.4. Осциллограмма отключения неудаленного КЗ ($90\% I_{o.\text{ном}}$) выключателем 170 кВ, 50 кА

режимами напряжения – с амплитудой, равной двукратному максимальному значению фазового напряжения. В наиболее тяжелом случае размыкания контактов в нуль тока пик напряжения достигается за половину периода промышленной частоты, когда межконтактное расстояние еще достаточно мало. Поэтому обеспечение коммутационной способности в данном режиме является одной из самых сложных задач и было достигнуто благодаря применению эффективной системы экранов и специальной формы изоляционного сопла. На рис.5 приведены зависимости пробивных напряжений дугогасительных контактов от времени, откуда видно, что в любой момент времени имеется превышение электрической прочности межконтактного промежутка над действующим напряжением.

При расчете изменения электрического поля в процессе отключения малых емкостных токов ненагруженной воздушной линии принято, что воздействующее на МКП напряжение изменяется по косинусоиде с частотой 60 Гц, максимальное напряжение между контактами равно 828 кВ.

С помощью изложенных методов расчета была разработана конструкция одноразрывного выключателя на номинальное напряжение 362 кВ и ток отключения 40 кА. Принципиальная конструкция опытного образца выключателя, предназначенного для проведения коммутационных испытаний в основных режимах, а также электрических и тепловых испытаний, представлена на рис.6.

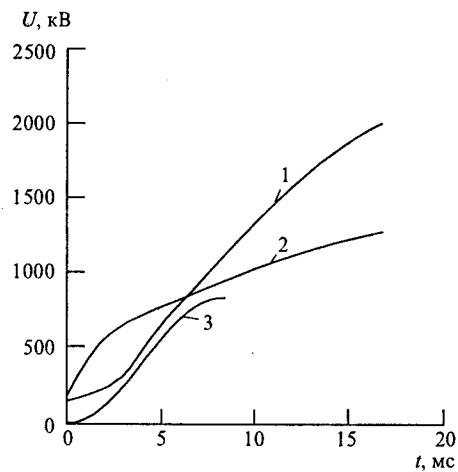


Рис.5. Зависимость пробивных напряжений межконтактного промежутка выключателя 362 кВ, 40 кА от времени при отключении емкостного тока холостой линии:

1 – электрическая прочность на неподвижном контакте; 2 – электрическая прочность на подвижном контакте; 3 – восстанавливающееся напряжение

Опытный образец выключателя представляется заземленный металлический бак с размещенным в нем дугогасительным устройством 1. Металлический бак после соединения с приводом 2 закрепляется на опоре 11. Высоковольтные вводы 3 и 4 подсоединяются к выключателю с помощью патрубков 5 и 6. Между выключателем и патрубками располагаются герметичные проходные изоляторы "элегаз–элегаз" 7. В местах соединения вводов с патрубками устанавливаются негерметичные изоляторы "элегаз–элегаз" 8.

Газовый объем образца делится на три отсека: (выключатель – ввод 3 и патрубок 5 – ввод 4, патрубок 5 и патрубок 6). Второй и третий газовые отсеки соединены трубками 9 и имеют одну и ту же систему заполнения и контроля газа 16. Давление газа в выключателе контролируется манометрами 10 и 17. Для повышения устойчивости при работе выключателя с приводом, он монтируется на раме 12 и поддерживаются специальными опорными конструкциями 13 и 14. Для поглощения влаги и продуктов разложения элегаза предусмотрен фильтр 15.

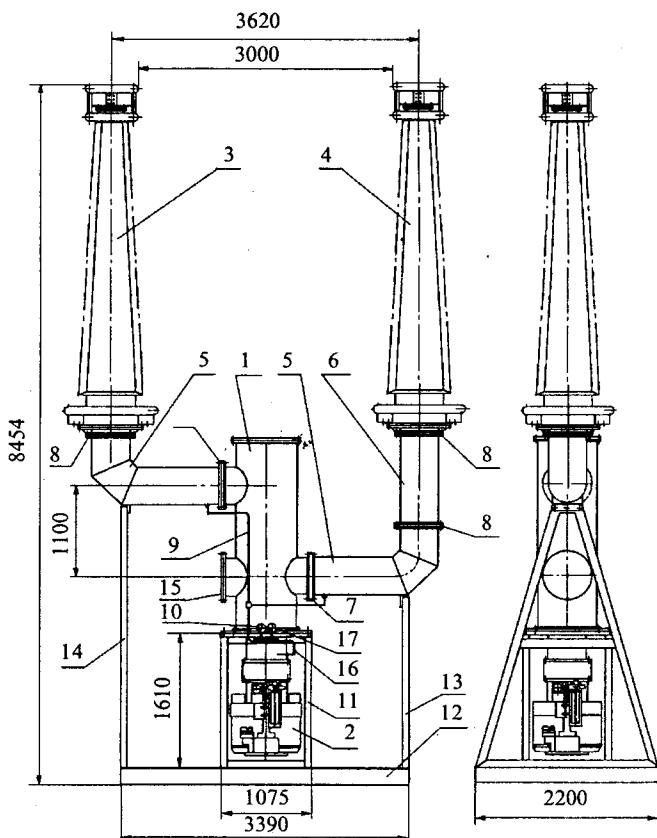


Рис.6. Опытный образец выключателя 362 кВ, 40 кА для испытаний электрической прочности изоляции и коммутационных испытаний

Также была разработана конструкция выключателя на напряжение 362 кВ, номинальный ток 8000 А и номинальный ток отключения 63 кА. Выключатель имеет два разрыва на полюс, каждый разрыв шунтирован емкостью. Усилие привода к подвижным частям дугогасительного устройства двухразрывного выключателя передается при помощи специального передаточного механизма. Большое внимание при разработке конструкции выключателя было уделено тепловому расчету контактов, токоведущих элементов главной цепи и оболочки выключателя при длительном протекании номинального тока 8000 А.

Следует отметить, что разработка выключателей на 170 и 362 кВ проводилась в рамках совместного проекта с фирмой "Samsung" (Республика Корея) по созданию КРУЭ 170–362 кВ.

Список литературы

1. Борин В.Н., Вариводов В.Н., Чемерис В.С. Новые тенденции в разработке высоковольтных коммутационных аппаратов с изоляцией SF₆ // Доклады V симпозиума "Электротехника-2010. Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000–2010 годах". 1999. Докл. 2–20. С.140–144.

2. Егоров В.Г., Камалов Р.С., Родина С.А. и др. Методы расчета элегазовых выключателей // Доклады II симпозиу-

ма "Электротехника-2010. Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000–2010 годах". 1994. Докл. 1–27. С.145–149.

3. Егоров В.Г., Родина С.А., Серяков К.И. Методика расчета автокомпрессионного дугогасительного устройства элегазового выключателя // Электротехника. 1990. № 10. С.26–31.

4. Камалов Р.С., Чемерис В.С., Чулков В.В. Расчет восстанавливающейся электрической прочности элегазовых автокомпрессионных выключателей // Электричество. 1995. № 2. С.21–26.

Егоров Владимир Георгиевич – старший научный сотрудник ВЭИ. Окончил факультет теоретической и экспериментальной физики МИФИ в 1970 г.

Колобанова Надежда Николаевна – научный сотрудник ВЭИ. Окончила электроэнергетический факультет МЭИ в 1976 г.

Торопчин Юрий Васильевич – старший научный сотрудник ВЭИ. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1975 г.

Чемерис Владлен Семенович – начальник сектора ВЭИ. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1953 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Коммутационная износостойкость элементов дугогасительных устройств автокомпрессионных элегазовых выключателей» в 1988 г.

Генераторные выключатели в цепи мощных энергоблоков и требования, предъявляемые к ним

**ЗОРИН Л.М. (ОАО «Гидропроект»), ПОДЬЯЧЕВ В.Н. (ОАО «Институт Энергосетьпроект»),
ШЛЕЙФМАН И.Л. (АББ Электроинжиниринг)**

Рассматриваются вопросы выбора генераторных выключателей для различных мощностей генераторов и схем генераторных цепей. Дается рекомендация о необходимости установки выключателей в цепях генераторов с обязательной защитной функцией – отключением повреждений в блочных трансформаторах.

Генераторные выключатели (далее выключатели), устанавливаемые в цепях генераторов энергоблоков (генератор–трансформатор, укрупненных электрических блоках – несколько генераторов–трансформатор), осуществляют следующие функции:

– оперативные: включение, отключение генератора с рабочими токами; отключение ненагруженного трансформатора; отключение генератора в режиме синхронного двигателя, т.е. обеспечивают процессы пуска, останова агрегатов;

– защитные: отключение токов КЗ в генераторе, трансформаторе и в цепях генераторного

напряжения; включение на токи КЗ и отключение; включение в условиях противофазы; отключение в условиях рассогласования фаз вплоть до противофазы при ошибочной синхронизации или при выпадении генератора из синхронизма.

Одним из основных параметров, определяющих выбор выключателя, является номинальный ток отключения ($I_{o,nom}$), обеспечивающий выполнение защитных функций. Как правило, при выборе выключателя принимается условие отключение максимального тока КЗ, протекающего через выключатель [1,2].

Таблица 1

| № | Генераторы | | | | Трансформаторы | | Токи КЗ, кА | | |
|----|------------------------------|---------------------|--------------------|---------|-------------------|-------------------------|-------------|----------------|------------------------|
| | Тип | $U_{\text{н}}$, кВ | I_{n} , А | X_d'' | Тип | e_k , % | Рисунок | От сети К-1 | От гене- ратора К-2 |
| 1 | ТВФ-110-2ЕУ3 | 18,0 | 6640 | 22,1 | ТДЦ-400000/500 | 13,0 | а | 93,6 | 27,3 |
| 2 | ТПВ-220-2ГУ3 | 15,75 | 9490 | 22,3 | ТЦ-250000/330 | 11,0 | а | 79,0 | 38,6 |
| 3 | ТВВ-320-2ЕУ3 | 20,0 | 11950 | 19,7 | ТЦ-400000/330 | 11,5 | а | 92,0 | 55,0 |
| 4 | ТВВ-500-2ЕУ3 | 20,0 | 18700 | 22,2 | ТНЦ-630000/330 | 11,5 | а | 138,0 | 76,6 |
| 5 | ТВВ-800-2ЕУ3 | 24,0 | 23500 | 21,0 | ТНЦ-1000000/220 | 11,5 | а | 154,0 | 99,1 |
| 6 | ТВВ-800-2ЕУ3 | 24,0 | 23000 | 21,0 | ТНЦ-1000000/330 | 11,5 | а | 169,0 | 99,1 |
| 7 | ВГС $\frac{1190}{135}$ - 120 | 10,5 | 7400 | 36,6 | ТЦ-275000/220 | 10,9 | б | 140,0 | 20,3 |
| 8 | СВ $\frac{1030}{120}$ - 68 | 10,5 | 3610 | 24,0 | АТДЦТН-250000/220 | ВС-11 ВН-32 СН-20 | в | 80,0 | 15,0 |
| 9 | СВ $\frac{1500}{150}$ - 88 | 13,8 | 5350 | 33,1 | 3хОДЦГ-135000/500 | | г | 100,0 | 16,1 |
| 10 | СВ $\frac{1470}{149}$ - 104 | 13,8 | 7700 | 24,3 | ТЦ-40000/500 | 13,0 | б | 170,0 | 32,0 |
| 11 | ВГС $\frac{1190}{215}$ - 48 | 15,75 | 10400 | 24,9 | ТЦ-630000/500 | 14,0 | в | 190,0 | 42,0 |

В табл.1 приведены номинальные параметры турбогенераторов мощностью 100–800 МВт (поз.1–6), гидрогенераторов мощностью 57–240 МВт (поз.7–11) и периодические составляющие трехфазных токов КЗ, протекающих через выключатель от системы (точка К-1) и от генератора (точка К-2) (рис.1–4).

Из табл.1 видно, что в схеме с турбогенераторами рис.1 токи КЗ от системы превышают токи КЗ от генераторов в 1,5–2 раза. Такое превышение справедливо и для гидрогенераторов по схеме рис.1. Для схем с укрупненными электрическими блоками на ГЭС (рис.2–4) токи КЗ от системы и других генераторов через выключатель превышают токи КЗ от генератора в 3–6 раз.

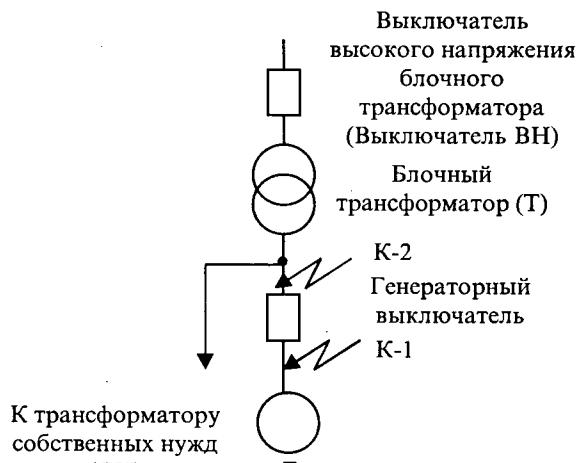


Рис.1

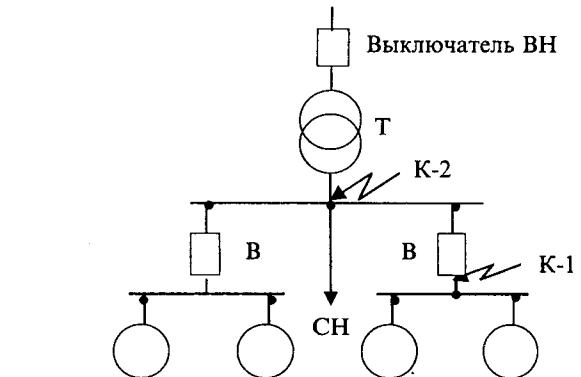


Рис.2

На электростанциях РФ и стран СНГ имеются решения, когда при отсутствии выключателя с $I_{\text{o,ном}}$, обеспечивающего отключение максимально-го тока КЗ, или по технико-экономическим соображениям соединение генератора с блочным трансформатором выполнено без выключателя, а все его функции

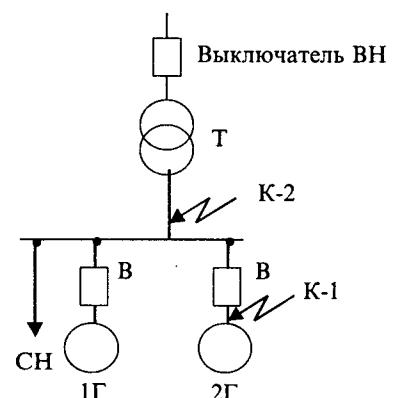


Рис.3

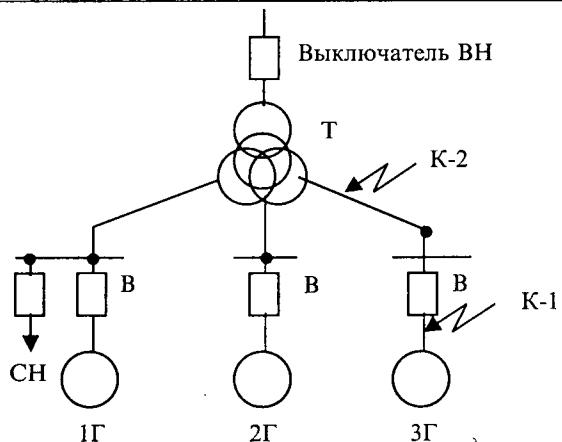


Рис.4

вложены на выключатель высокого напряжения блочного трансформатора (выключатель ВН). Такие решения приводят к некоторому снижению надежности схем высокого напряжения, усложнению схем питания собственных нужд и систем управления агрегатами.

Имеются также решения, когда по указанным причинам в цепи генератора установлен выключатель нагрузки – аппарат, рассчитанный на выполнение только оперативных функций выключателя, а защитные функции возложены на выключатель ВН. Это облегчает условия работы выключателя ВН и управления агрегатом.

Как показывают расчеты [3] указанные решения недостаточны для защиты трансформатора при внутренних КЗ, так как продолжительность тока КЗ при отсутствии выключателя определяется временем гашения поля генератора, которое составляет порядка 1,5 с. Такое время подпитки дуги КЗ в трансформаторе приводит к разрушению бака, возгоранию масла и обмоток трансформатора. Отечественный и зарубежный опыт это подтверждает, после такой аварии трансформатор не восстанавливается.

При наличии выключателя в цепи генератора ток КЗ прерывается за 0,05–0,1 с. В этом случае, как показывает практика, разрушение бака трансформатора не происходит и поврежденный трансформатор восстанавливается.

Поэтому установку в цепи генератора выключателя, обеспечивающего отключение тока КЗ от генератора, следует считать обязательной и это будет соответствовать ГОСТ 12.1.010 "Взрывобезопасность. Общие требования." Пункт 2.6 "Предотвращение возникновения источника инициирования взрыва должно быть обеспечено: ... применением быстродействующих средств защитного отключения возможных электрических источников инициирования взрыва."

Что касается отключения тока КЗ от системы, то как показывает практика, оно может быть возложено на выключатель ВН, при этом время воздействия на оборудование тока подпитки КЗ от энергосистем будет снижено, а ощущимых последствий по снижению надежности из-за перевода питания сети собственных нужд на резервный трансформатор не ожидается.

Учитывая сказанное, параметр $I_{o,nom}$ выключателя может приниматься по току КЗ от генератора при условии обеспечения выключателем электродинамической и термической стойкости к сквозному току КЗ–току КЗ от системы.

В качестве примера в табл.2 приведены параметры выпускаемых в настоящее время в РФ и фирмами "ABB High Voltage Technologies" и "GEC ALSTHOM" выключателей [4–6], которые выбраны отдельно с привязкой к токам КЗ от системы и к току КЗ от генератора, последние отмечены знаком *, по данным табл.1.

Из табл.2 видно, что K_d – коэффициенты электродинамической стойкости выключателей, обеспечивающих отключение только тока КЗ от генератора, должны превышать стандартное значение 2,55 в 1,05 – 3 раза для обеспечения электродинамической стойкости выключателей к токам КЗ от системы. Термическая стойкость должна быть увеличена в $[I_{K3} \text{ (в т. K-1)} / I_{o,nom}]^2$ раза или должно быть уменьшено время протекания тока КЗ от системы по отношению к нормативу (3 с) в $[I_{o,nom} / I_{K3} \text{ (в т. K-1)}]^2$ раза. Последнее целесообразно использовать, если время протекание тока КЗ сокращается не более чем до 1,5 с, что при современных средствах защиты вполне приемлемо. В остальных случаях следует учитывать совместно уменьшение времени воздействия тока КЗ и конструктивное увеличение термической стойкости выключателя.

Исполнение выключателей с повышенной электродинамической и термической стойкостью предусматривается пп. 3.5.1, 3.5.2 ГОСТ 687 "Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия".

Анализ конструкций современных выключателей показывает, что эти требования выполнимы, у ряда выключателей $K_d = 3$, а установленный на Усть-Илимской ГЭС выключатель нагрузки имеет $K_d = 13$.

Повышение требований к электродинамической и термической стойкости для существующего ряда генераторных выключателей и доработка выпускаемых выключателей до уровня, отвечающего этим требованиям, позволит применять один и тот же аппарат в электрических схемах.

Таблица 2

| № | Параметры генерат. цепи | | | Параметры выключателя | | | | Тип | Изготовитель ¹ | | |
|----|-------------------------|-----------|-------------|-----------------------|------------|-----------|-----------------|------|---------------------------|--|--|
| | U_n , кВ | I_n , А | Токи КЗ, кА | | U_n , кВ | I_n , А | $I_{o,nom}$, А | | | | |
| | | | K-1 | K-2 | | | | | | | |
| 1 | 18,0 | 6640 | 93,6 | 27,3 | 20,0 | 12500 | 160 | 2,55 | ВВГ-20 | | |
| | | | | | 20,0 | 12500 | *63 | 3,79 | ВЭГ-20 | | |
| | | | | | 24,0 | 8000 | *63 | 3,79 | НЕК 2 | | |
| | | | | | 24,0 | 12000 | 100 | 3,00 | НЕС 3 | | |
| | | | | | 17,5 | 8000 | *63 | 3,79 | HG1 3 | | |
| 2 | 15,75 | 9490 | 79 | 38,6 | 20,0 | 12500 | 160 | 2,55 | ВВГ-20 | | |
| | | | | | 20,0 | 12500 | *63 | 3,2 | ВЭГ-20 | | |
| | | | | | 24,0 | 10000 | 100 | 2,55 | ИКСНІ | | |
| 3 | 20,0 | 11950 | 92,0 | 55,0 | 20,0 | 12500 | 160 | 2,55 | ВВГ-20 | | |
| | | | | | 20,0 | 12500 | *63 | 3,72 | ВЭГ-20 | | |
| | | | | | 24,0 | 12000 | 100 | 3,00 | НЕС 3 | | |
| 4 | 20,0 | 18700 | 138 | 76,6 | 20,0 | 20000 | 160 | 2,55 | ВВГ-20 | | |
| | | | | | 36,0 | 24000 | 160 | 2,55 | НЕС 7/8 | | |
| | | | | | 24,0 | 24000 | *100 | 3,52 | НЕС 4 | | |
| 5 | 24,0 | 23500 | 154 | 99,1 | 36,0 | 24000 | 160 | 2,55 | НЕС 7/8 | | |
| | | | | | 24,0 | 24000 | *100 | 3,93 | НЕС 4 | | |
| 6 | 24,0 | 23500 | 169 | 99,1 | 36,0 | 24000 | *160 | 2,69 | НЕС 7/8 | | |
| | | | | | 24,0 | 24000 | *100 | 4,30 | НЕС 4 | | |
| 7 | 10,5 | 7400 | 140 | 20,3 | 20,0 | 12500 | 160 | 2,55 | ВВГ-20 | | |
| | | | | | 20,0 | 12500 | *63 | 5,66 | ВЭГ-20 | | |
| | | | | | 17,5 | 8000 | *63 | 5,66 | HG1 3 | | |
| | | | | | 20,0 | 8000 | *90 | 4,00 | ВГМ-20 | | |
| 8 | 10,5 | 3600 | 80 | 15,0 | 20,0 | 6300 | 90 | 2,55 | МГУ-20 | | |
| | | | | | 10,0 | 5000 | *63 | 3,23 | МГГ-10 | | |
| | | | | | 24,0 | 10000 | 100 | 2,80 | ИКСНІ | | |
| | | | | | 17,5 | 8000 | *63 | 3,20 | HG1 3 | | |
| 9 | 13,8 | 5350 | 100 | 16,1 | 20,0 | 12500 | 160 | 2,55 | ВВГ-20 | | |
| | | | | | 20,0 | 12500 | *63 | 4,00 | ОАО, ЭА, С-П | | |
| | | | | | 20,0 | 6300 | 105 | 2,55 | ВЭГ-20 | | |
| | | | | | 24,0 | 12000 | 100 | 3,00 | МГУ-20 | | |
| | | | | | 17,5 | 6300 | *50 | 5,10 | НЕС 3 | | |
| 10 | 13,8 | 7700 | 170 | 32,0 | 20,0 | 12500 | *63 | 6,88 | ВЭГ-20 | | |
| | | | | | 24,0 | 12000 | *100 | 4,34 | НЕС 3 | | |
| | | | | | 17,5 | 8000 | *63 | 6,88 | HG1 3 | | |
| 11 | 15,75 | 10400 | 190 | 42,0 | 20,0 | 12500 | *63 | 7,69 | ВЭГ-20 | | |
| | | | | | 24,0 | 12000 | *100 | 4,85 | НЕС 3 | | |

¹ ОАО, ЭА, С-П – ОАО высоковольтного оборудования, С-Петербург;
 ОАО, ЭА, Н-Т – ОАО "Нижнетуринский электроаппаратный завод";
 ABB – "ABBHigh Voltage Technologies";
 G – A – "GEC ALSTHOM"

макс с разными значениями токов КЗ.

В настоящее время в РФ решается задача обновления оборудования на электростанциях, проработавших 30 и более лет. При этом должна производиться замена выключателей, полностью выработавших свой ресурс. В ряде случаев выбор выключателей для замены по номинальным токам генераторов и токам КЗ от генераторов позволит получить оптимальные технико-экономические решения с обеспечением всех защитных и оперативных функций.

Так, для мощных турбогенераторов 500 МВт

и более с токами КЗ от системы более 140 кА (поз.5, б табл.1, 2) выбор выключателей по токам КЗ от генераторов позволит использовать выключатели с $I_{o,nom} = 100$ или 120 кА с необходимой электродинамической и термической стойкостью, вместо выключателей с $I_{o,nom} = 160$ кА и более, что даст значительный выигрыш по весовым, габаритным и стоимостным показателям.

Примеры такого выбора выключателей фирм ABB представлены в табл.3.

Для действующих ГЭС с укрупненными элек-

Таблица 3

**Примеры применения генераторных выключателей компании АББ,
адаптированных к схемам электростанций**

| Тип выключателя | Название электростанции | Страна | Тип электростанции | Мощность блока, | | Напряжение, кВ | Ток откл. ном., кА |
|-----------------|---------------------------|-----------|--------------------|-----------------|------|----------------|--------------------|
| | | | | МВт | МВ·А | | |
| DR 36 u 1250 | Atucha II | Аргентина | АЭС | 746 | 838 | 21 | 120 |
| DR 36 u 1250 | Guangdong Daya Bay | Канада | АЭС | 983 | 1185 | 26 | 120 |
| DR 36 u 1250 | Tihange 2 | Бельгия | АЭС | 1130 | 1330 | 24 | 120 |
| DR 36 u 1250 | Tihange 3 | Бельгия | АЭС | 1130 | 1330 | 24 | 120 |
| DR 36 u 1250 | Torness 2 блока | Шотландия | АЭС | 667 | 780 | 23,5 | 120 |
| HEC 7 | Quishan CANDU блоки 1 и 2 | Канада | АЭС | 850 | 1000 | 24 | 160 |
| HEC 8 | Niederaussem K | Германия | ТЭС | 1100 | 1220 | 27 | 160 |
| HEC 7 | Lianyungang блоки 1 и 2 | Китай | АЭС | 1000 | 1111 | 24 | 160 |
| HEC 7 | Hitachi-Naka | Япония | ТЭС | 1000 | 1163 | 19 | 160 |

трическими блоками выбор выключателей, обеспечивающих отключение только тока КЗ от генераторов, позволяет координировать выбор номинального тока выключателя с номинальным током генератора (рабочим током через выключатель для схемы рис.2).

Следует отметить, что установленные на ГЭС выключатели типов МГГ-229, ВВ-15, ВВ-20С, ВВГ-20 имеют отношение $(I_{\text{о.ном}} / I_{\text{н}}) \approx 12 \div 22$. У современных элегазовых выключателей фирмы ABB и других зарубежных фирм эти отношения порядка 8, а у выключателя элегазового типа ВЭГ-20 завода ЭА (г. С.-Петербург) оно равно 5.

В связи с указанным при выборе элегазовых выключателей для укрупненных электрических блоков по току КЗ от системы и других генераторов, $I_{\text{н}}$ выключателей будет превышать $I_{\text{н}}$ генераторов (рабочие токи через выключатели в схеме рис.2) в 1,7–2,7 раза, и в ряде случаев их применение из-за больших габаритов, весовых и стоимостных показателей будет неоправданным.

Таким образом, принцип выбора выключателя по току КЗ от генератора имеет достаточно широкий спектр применения.

Для схем с генераторными выключателями, обеспечивающими отключение токов КЗ только от генераторов, необходимо применение соответствующей логики действия электрических защит.

Проведенные предварительные проработки показывают, что изменения в логике действия защит будут в основном касаться дифференциальных защит генератора, блочного трансформатора и блока.

Дифференциальная защита генератора и диф-

ференциальная защита блока должны сначала действовать на отключение выключателя ВН, а в укрупненных электрических блоках и на отключение выключателей неповрежденных цепей генераторов. После отключения указанных выключателей должен отключаться выключатель поврежденной цепи, затем должен включаться выключатель ВН для восстановления питания собственных нужд, а в укрупненных электрических блоках могут включаться в сеть генераторы с неповрежденными цепями.

Дифференциальная защита блочного трансформатора должна действовать одновременно на отключение выключателя ВН и выключателя генератора поврежденной цепи.

В зону действия дифференциальной защиты генератора следует включать выключатель генератора.

Принципиальная схема действий дифференциальных защит показана на рис.5.

Выключатель ВН

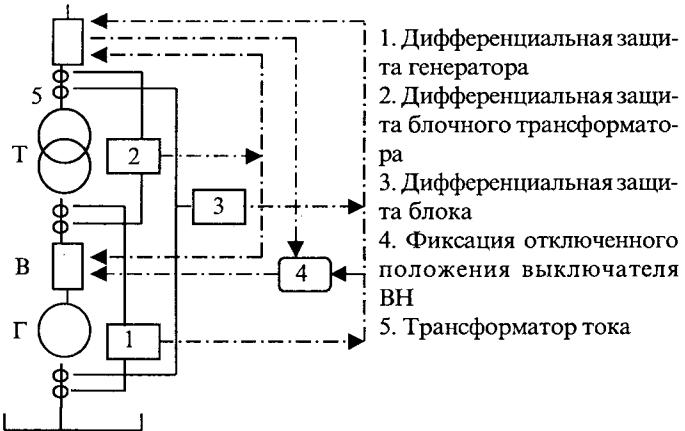


Рис.5

Выводы

1. Оперативные функции, выполняемые генераторными выключателями, обеспечивают эксплуатационную надежность выключателей распределительных устройств высокого напряжения, электроснабжения собственных нужд и оперативного управления электростанциями.

Необходимой защитной функцией генераторного выключателя является отключение тока КЗ от генератора, которое при КЗ в блочном трансформаторе предотвращает возможность его разрушения.

Учитывая эти положения установка генераторного выключателя, как правило, должна быть обязательной.

2. При токах КЗ через генераторный выключатель от системы порядка 100 кА генераторный выключатель целесообразно выбирать с $I_{o.\text{ном}}$, обеспечивающим отключение тока КЗ от генератора, возлагая отключение тока КЗ от системы на выключатели высокого напряжения блочного трансформатора. При этом должны обеспечиваться электродинамическая и термическая стойкость этого выключателя к токам КЗ от системы и все другие защитные функции.

3. Генераторные выключатели с повышенной электродинамической и термической стойкостью найдут широкую область применения в электрических схемах с разными токами КЗ и снимут сложнейшую проблему разработки, изготовления и испытаний генераторных выключателей с $I_{o.\text{ном}} > 100 \text{ кA}$.

4. Для реализации указанных в п.2 положений рекомендуется:

– проектным институтам обосновать и передать заводам-изготовителям генераторных выключателей требования по предельным параметрам электродинамической и термической стойкости выключателей в увязке с их номинальными токами, разработать логику действия электрических защит;

– заводам-изготовителям генераторных выключателей провести испытание выпускаемых выключателей для выявления реально допустимых параметров их электродинамической и термической стойкости.

Список литературы

1. Подьячев В.Н., Плессер М.А., Дорф Г.А., Кузьмичева К.И. Выключатели и нелинейные ограничители перенапряжений в цепях генераторов энергоблоков 100–800 МВт // Энергетик, 2000. № 1.

2. Шлейфман И.Л., Колядина Н.А., Чучукин Г.В. Требования к мощным генераторным выключателям и методы испытаний // Энергохозяйство за рубежом. 1990. № 2.

3. Braun D., Widenhorn K., Ischi J. Impact of the electrical layout on the availability of a power plant // 11 CEPSI.

4. Culver B., Frohlich K., Widenhorn K. Предотвращение разрыва бака при авариях силовых трансформаторов с помощью отключения генераторного выключателя // Элегазовые генераторные выключатели: применение при реконструкции и строительстве новых энергообъектов. Опыт ABB High Current System. 2000.

5. Power Transformer Tank Rupture: Risk Assessment and Mitigation // Electric Power Research Institute (EPRI). 1995.

6. Braun D. Generator protection in case of partially rated generator circuit-breaker scheem // Report of ABB High Voltage Technologies, Zurich. May 2000.

Коммутационные процессы в вакуумных выключателях с параллельным соединением дугогасительных камер

ПЕРЦЕВ А.А., БЕЛКИН Г.С., РЫЛЬСКАЯ Л.А.

Рассмотрены процессы деления тока между соединенными параллельно вакуумными дугогасительными камерами при выполнении выключателем операций включения тока КЗ и его отключения. Показано, что при ограничении разновременности смыкания и размыкания контактов камер временем менее 2 мс и при обеспечении момента размыкания контактов последней камерой не позднее, чем за 3 мс до перехода тока через нуль, параллельное соединение камер позволяет увеличить номинальные значения параметров коммутируемого тока КЗ относительно соответствующих параметров одной камеры практически кратно числу камер.

Для увеличения значений номинального тока и номинального тока отключения вакуумных сильноточных выключателей предложено применять параллельное соединение вакуумных дугогасительных камер (камеры) в каждом полю-

се этих выключателей [1]. При этом надежная работа выключателя обусловливается контролем за фазой размыкания контактов камер, которая должна приходиться на момент существенно раньше нуля тока, чтобы к нулю тока

Таблица 1

| Параметр | Выключатель ЗАНЗ 228-7 | Генераторный выключатель из трех ЗАНЗ 228-7 | Генераторный выключатель для России |
|---------------------------------------|------------------------|---|-------------------------------------|
| Номинальное напряжение, кВ | 17,5 | 17,5 | 15; 20 |
| Номинальный ток, А | 3150 | 3150×3 | 6000; 8000 |
| Номинальный ток отключения, кА | 63 | 80 | 80; 100 |
| Наибольший пик тока при включении, кА | 160 | 200 | 240; 300 |

контакты разошлись на достаточное расстояние. Тем самым исключается возможность возникновения пробоев в параллельных камерах под воздействием восстановливающегося напряжения и протекания в одной из них отключаемого тока КЗ с катастрофическими для нее последствиями. Идея [1] 35-летней давности долгое время оставалась невостребованной, поскольку увеличение коммутируемой вакуумными выключателями мощности достигалось путем повышения параметров камер. Так, в [2] приведены данные о вакуумном выключателе ЗАНЗ 228-7 с параметрами, представленными в табл.1.

Эти параметры достигнуты при использовании в каждом полюсе выключателя по одной камере.

Однако имеется потребность, хотя и ограниченная, в еще более мощных аппаратах. В [2] в качестве варианта решения задачи увеличения коммутируемой аппаратом мощности применено параллельное соединение трех полюсов выключателя ЗАНЗ 228-7 с использованием его в качестве полюса генераторного выключателя, т.е. генераторный выключатель состоит из трех выключателей ЗАНЗ, каждый из которых образует его полюс. Основные параметры такого выключателя приведены в табл.1. Сопоставление данных табл.1 показывает, что параллельное соединение трех камер в полюсе позволяет практически утроить номинальный ток выключателя. При этом значения номинального тока отключения и наибольшего пика тока при включении возросли примерно лишь на 25%. Увеличение значений коммутируемого вакуумными выключателями тока КЗ сохраняет свою актуальность. В табл.1 приведены также основные параметры вакуумного генераторного выключателя, который мог бы найти широкое использование в энергетике России. Таким аппаратом мог бы быть заменен маломасляный выключатель МГУ-20. Новый выключатель должен коммутировать ток КЗ значением до 100 кА при наибольшем пике при включении до 300 кА. Очевидно, что решение [2] оказывается недоста-

точно сильным. Повышение параметров коммутируемого аппаратом тока КЗ возможно через более детальное исследование коммутационных процессов в вакуумных выключателях с параллельными камерами. Этой теме и посвящена предлагаемая работа. В ней приведены результаты экспериментальных исследований влияния разновременности смыкания и размыкания контактов параллельных камер в операциях, соответственно, включения и отключения, а также решения задачи деления тока между камерами.

Методика испытаний

Эксперименты по выявлению коммутационных процессов в полюсе вакуумного выключателя с параллельными камерами выполнены на макете, электрическая схема которого приведена на рис.1. Макет содержал две камеры контакты которых возбуждают аксиальное магнитное поле и рассчитаны на номинальный ток отключения 40 кА, наибольший пик тока при включении 100 кА при контактном нажатии 3 кН. Последовательно с камерами включены безиндуктивные шунты $Ш_1$ и $Ш_2$ сопротивлением по 124 мкОм. Соединение камер с шунтами и присоединение их к сборным шинам K_1 и K_2 осуществлялось медными шинами, длина которых между точками присоединения к сборным

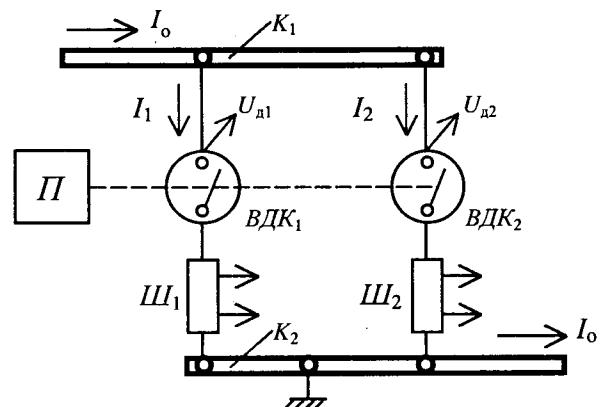


Рис.1. Схема испытаний:

K_1 , K_2 – сборные шины; $ВДК_1$, $ВДК_2$ – вакуумные дугогасительные камеры; $Ш_1$, $Ш_2$ – резисторы-шунты, $R = 124$ мкОм; $П$ – привод; I_1 , I_2 – токи ветвей; $U_{д1}$, $U_{д2}$ – напряжения дуги

шинам составляла около 1 м. Приняты меры по выравниванию между собою полных сопротивлений токовых ветвей с камерами. Управление подвижными контактами камер осуществлялось от общего привода P с возможностью независимой регулировки разновременности смыкания и размыкания контактов в операциях и циклах включения и отключения (ВО). Макет нагружался током I_o от генератора ТИ-100, позволяющего получать наибольшее значение пика тока при включении $i_b = 150$ кА и наибольшее действующее значение периодической составляющей $I_b = 80$ кА. Значение периодической составляющей тока КЗ от опыта к опыту варьировалось изменением напряжения генератора ТИ-100 при неизменности сопротивления цепи тока. Значение пика тока КЗ определялось начальной фазой и также могло произвольно изменяться в широких пределах.

Выполнено две группы опытов. Первая – циклы ВО, в которых макетом включался ток КЗ с наибольшим пиком от 68 до 150 кА при разновременности включения камер от 2 до 4 мс и отключался ток с периодической составляющей до 54 кА.

Запись процессов при реализации испытательных циклов ВО представлена на рис.2. Из рис.2 следует, что примерно через 90 мс после подачи команды на включение (кривая 1) контакты камер смыкались, и через полюс выключ-

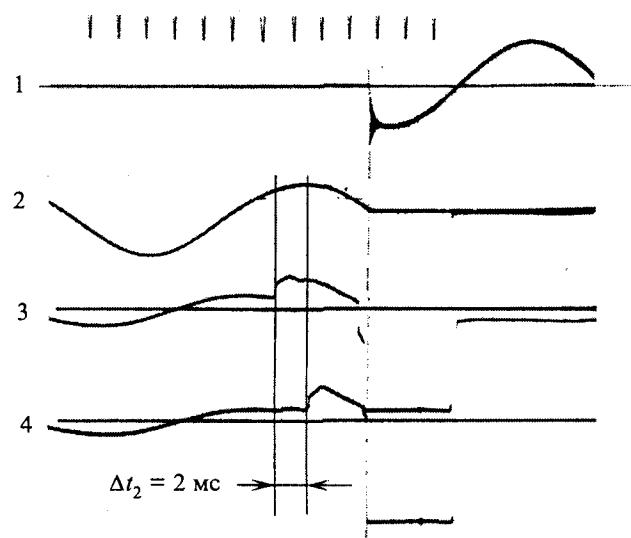


Рис.3. Напряжение дуги камер при отключении тока КЗ с разновременностью размыкания контактов Δt_2 (записано в операции отключения в цикле ВО, представленном на рис.2; метки времени через 2 мс):

1 – восстанавливающееся напряжение; 2 – ток КЗ; 3, 4 – напряжение дуги U_{d2} , U_{d1} камер BDK_2 и BDK_1 соответственно

чателя начинал протекать ток КЗ (кривая 3). За 40–50 мс до смыкания контактов камер от генератора ТИ-100 на испытуемый выключатель подавалось напряжение (кривая 6). Через интервал около 40 мс после смыкания контактов подавалась команда на отключение выключателя (кривая 2) и через собственное время отключения выключателя, также равное 35–40 мс, начинался процесс дугогашения, который завершался при первом переходе тока через нулевое значение. Моменты размыкания контактов камер контролировались по напряжениям дуги в каждой из них, рис.3, записанным с помощью катодных повторителей. Таким обра-

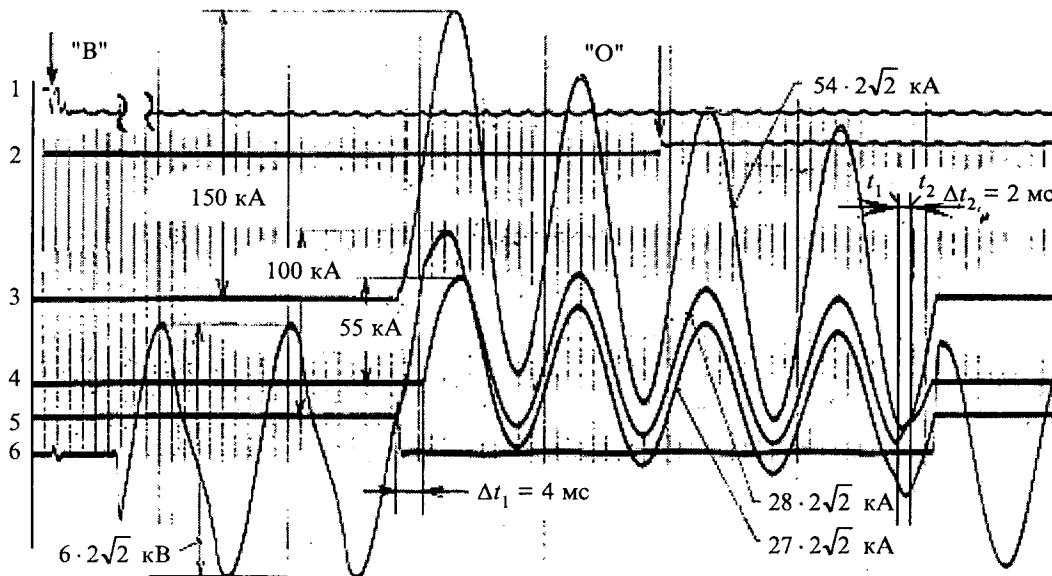


Рис.2. Осциллограмма цикла ВО, выполненного макетом полюса выключателя с двумя параллельными камерами, при включении на КЗ с наибольшим пиком тока 150 кА (метки времени через 2 мс):

1 – команда на включение; 2 – команда на отключение; 3 – ток макета; 4 – ток BDK_2 ; 5 – ток BDK_1 ; 6 – напряжение на макете

зом, продолжительность протекания тока КЗ составляла около 80 мс или 8 полуволн тока. Через 50 мс после прерывания тока напряжение с макета снималось.

Во второй группе производился наброс симметричного тока КЗ с периодической составляющей до 80 кА на предварительные замкнутые контакты в обеих камерах и последующее его отключение при синфазном размыкании контактов.

Результаты испытаний в режиме включения

С помощью кривых 4 и 5 (рис.2) можно судить о токах через камеры 1 и 2 в режиме включения, об их наибольших пиках i_{b1} и i_{b2} , о темпе изменения распределения тока I_o макета между камерами и о значении разновременности Δt_1 включения камер 1 и 2. Кривая 6 дает возможность определять значение начальной фазы включения тока КЗ, которая составляет $\psi = \arcsin \frac{U}{U_m}$, где U – мгновенное значение напряжения на макете при включении тока; U_m – амплитуда напряжения на макете. В опыте

$$(рис.2) U_m = 6\sqrt{2} \text{ кВ}, U \approx 3 \text{ кВ}, \frac{U}{U_m} \approx 0,35;$$

$\psi = \arcsin 0,35; \psi \approx 20^\circ$. Подобные осциллограммы получены в еще восьми опытах. Результаты их обработки сведены в табл.2.

В табл.2: I_b – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ; i_b – наибольший пик тока КЗ через макет при включении; i_{b1} , i_{b2} – наибольшие пики тока КЗ соответственно через первую и вторую камеры; Δt_1 – разновременность включения первой и второй камер; ψ – начальная фаза (определяет мгновенное значение напряжения генератора в момент тока КЗ).

Из табл.2 видно, что диапазоны изменения значений периодической составляющей тока

находятся в пределах 42–60 кА, наибольшее значение пика тока 68–150 кА, разновременность 2–4 мс и фаза включения 20–105°. Широкий диапазон изменения электрического режима включения тока КЗ позволяет выявить следующие тенденции:

1. Существенная неравномерность деления пика тока КЗ между камерами. Отношение пиков тока первой и второй включившихся камер i_{b1}/i_{b2} может превышать трехкратное значение (строки 1, 4, 6, 8). Неравномерность возрастает с увеличением начальной фазы ψ .

2. Неравномерность деления пика тока возрастает с увеличением разновременности Δt_1 (строки 2, 3, 5, 8).

3. Наибольшие абсолютные значения пика тока через первую из включившихся камер приходятся на малые начальные фазы ($\psi < 30^\circ$, строки 7,9). Это наиболее тяжелый для камеры режим включения, поскольку с уменьшением ψ растут наибольшие абсолютные значения пика тока при КЗ.

Неодновременность включения камер необходимо минимизировать, чтобы уменьшить нагрузку на первую включившуюся камеру. В реальных выключателях невозможно свести к нулю неодновременность включения камер.

Это связано с двумя причинами. Первая состоит в неизбежной разновременности механического смыкания контактов параллельных камер. При скорости сближения контактов в операции включения $v \approx 1 \text{ м/с}$ обеспечить разновременность смыкания менее 1 мс трудно. Будем считать приемлемой разновременность механического смыкания контактов 1 мс. Вторая причина состоит в возможности возникновения дуги предвключения в одной из параллельных камер до смыкания контактов. При этом лишь через эту камеру пойдет весь ток полюса выключателя. И поскольку напряжение на других параллельных камерах полюса снизится до напряжения дуги первой камеры, а это несколько десятков вольт, то переход тока на эти камеры начнется лишь при механическом смыкании их контактов. Для оценки времени существования дуги предвключения с приемлемой достоверностью можно принять значение пробивной напряженности межконтактного промежутка длиной порядка 1 мм для контактов из хромомедной композиции $E_{np} \approx 30 \text{ кВ/мм}$. Тогда при амплитудном значении напряжения на полюсе U_m пробой межконтактного промежутка произойдет при его длине $d < U_m/E_{np}$. Для выключателя на номинальное напряжение $U_n = 20 \text{ кВ}$ амплитуда

Таблица 2

| № | I_b , кА | i_b , кА | Δt_1 , мс | ψ , град | i_{b1} , кА | i_{b2} , кА | i_{b1}/i_{b2} |
|---|------------|------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| 1 | 42 | 68 | 2 | 105 | 34 | 9 | 3,8 |
| 2 | 50 | 94 | 2 | 60 | 57 | 33 | 1,7 |
| 3 | 57 | 113 | 2 | 60 | 73 | 42 | 1,7 |
| 4 | 57 | 81 | 3 | 90 | 63 | 17 | 3,7 |
| 5 | 60 | 115 | 3 | 60 | 81 | 31 | 2,6 |
| 6 | 57 | 81 | 3,5 | 85 | 68 | 16 | 4,3 |
| 7 | 60 | 145 | 3,5 | 30 | 94 | 51 | 1,8 |
| 8 | 60 | 117 | 4 | 60 | 88 | 28 | 3,1 |
| 9 | 60 | 150 | 4 | 20 | 100 | 55 | 1,8 |

фазного напряжения $U_m = 16,2$ кВ и длина промежутка при пробое $d \leq U_m/E_{\text{пр}} = 16,2/30 = 0,54$ мм. При скорости сближения контактов $v = 1$ м/с время дуги предвключения $\Delta t_d = d/v = 0,54 \cdot 10^{-3}/1 = 0,54 \cdot 10^{-3}$ с, т.е. $\Delta t_d \approx 0,5$ мс.

В целом с учетом разновременности механического смыкания контактов и времени существования дуги предвключения можно считать "нормальным" для суммарного значения $\Delta t_1 < 2$ мс.

Превышение этого значения лучше не допускать. В этой связи необходимо признать нежелательным снижение скорости контактов при смыкании менее 1 м/с, поскольку это приведет к увеличению значения Δt_1 и токовой нагрузки на первую из включающихся камер.

При включении на КЗ обычно немедленно подается команда на отключение выключателя. Быстрая исполнения этой команды лимитируется собственным временем отключения выключателя t_c с добавлением 10 мс. Минимальное значение собственного времени отключения вакуумных выключателей редко бывает менее 40 мс. Примем $t_c = 40$ мс. Для успешного отключения тока КЗ необходимо, чтобы за время t_c произошло нивелирование неравномерности деления тока между параллельными камерами, возникающей при включении за счет неодновременности Δt_1 . При этом условии будет исключена перегрузка камер и каждая из них будет отключать ток не более ее номинального тока отключения, а весь полюс сможет отключить ток, равный сумме номинальных токов отключения камер.

Чтобы за время t_c произошло это выравнивание необходимо, чтобы электромагнитная постоянная времени τ каждой из токовых ветвей была бы примерно втрое меньше собственного времени отключения выключателя, т.е. $\tau < 0,3t_c$. Из теории переходных процессов известно, что $\tau = L/R_o$, где L и R_o , соответственно, индуктивность и активное сопротивление токовой ветви, включая индуктивность и активное сопротивление камеры при сомкнутых контактах. Сопротивлением участков сборных шин между точками присоединения токовых ветвей пренебрегаем, поскольку оно относительно мало.

Для испытуемого макета выключателя минимальное значение индуктивности токовой ветви с протяженностью пути тока около 1 м, включая путь по индукторам контактов камеры, можно оценить как $L \approx 1 \cdot 10^{-6}$ Гн. Тогда для $\tau < 0,3 t_c = 0,3 \cdot 40 = 12$ мс значение R_o должно быть не менее $R_o \geq L/\tau = 1 \cdot 10^{-6}/12 \cdot 10^{-3} = 0,84 \cdot 10^{-4}$ Ом, т.е. 84 мкОм.

Сопротивление камеры постоянному току в

аппаратах на номинальный ток 1600 А и более обычно не превышает $r = 15$ мкОм, поэтому для достижения $\tau \leq 12$ мс последовательно с камерой необходимо включить резистор R сопротивлением не менее 70 мкОм. В нашем случае (рис.1) включены резисторы W_1 и W_2 по 124 мкОм, а потому $\tau = L/R_o = L/(r+R) = 1 \cdot 10^{-6}/139 \cdot 10^{-6} = 0,007$ с, т.е. $\tau = 7$ мс и полное выравнивание тока между ветвями должно произойти за время $3\tau = 21$ мс, т.е. за две полуволны тока. Это и можно видеть на осциллограмме (рис.2). За собственное время выключателя ($t_c \approx 40$ мс) при условии подачи команды на отключение сразу при включении тока КЗ контакты параллельных камер ВДК₁ и ВДК₂ (рис.1) начали бы расходиться на пятой полуволне тока, когда периодическая составляющая тока полюса равна 54 кА, а токи через камеры равны 27 и 28 кА, т.е. разделены между ними практически поровну, как это следует из условия равенства полных сопротивлений $Z_1 = Z_2$ токовых ветвей. И это после того, когда начальная асимметрия пиков тока была почти двукратной: 100 кА через первую камеру и 55 кА через вторую (рис.2). Выше указывалось, что при реализации конструкции полюса выключателя принимались меры по выравниванию между собою полных сопротивлений, содержащих камеры токовых ветвей, т.е. $Z_1 = Z_2 = Z = \sqrt{R_o^2 + (\omega L)^2}$. Лишь при выполнении этого условия можно рассчитывать на равномерное деление между параллельными камерами длительно протекающего через полюс тока, а также на перераспределение к равномерному изначально существенно искаженного распределения тока между камерами.

Условия деления тока между двумя соединенными параллельно токовыми ветвями могут быть распространены на три и более токовых ветвей. Обусловлено это тем, что от числа ветвей не зависит значение Δt_1 – разность моментов включения первой и следующей за ней другой камеры, в какой бы ветви она не находилась. А при неизменности значения Δt_1 не изменяется при прочих одинаковых условиях значение пика тока через первую камеру,ирующую, как показано, в наиболее тяжелом режиме и определяющую успех выполнения цикла ВО.

С увеличением числа токовых ветвей при наличии эффективного метода равномерного деления тока между ними за время не более t_c появляется возможность после включения выключателя на КЗ произвести его немедленное отключение. При этом наибольший пик тока вык-

лючателя при включении может достигать $i_v = ni_{v, \text{ВДК}}$, значение номинального тока отключения выключателя может достигать $I_{\text{н.о.}} = 0,9nI_{\text{н.о.ВДК}}$, где n – число токовых ветвей в полюсе выключателя; $i_{v, \text{ВДК}}$ – наибольший пик тока включения камеры; $I_{\text{н.о.ВДК}}$ – номинальный ток отключения камеры; 0,9 – коэффициент запаса.

При необходимости увеличить длину ошибки токовой ветви, а следовательно, и ее индуктивности приходится идти на повышение R для сохранения приемлемого значения τ . При этом возрастают потери в ветви. Представляется достаточным для большинства практических случаев, если R не будет превышать 20-кратного значения сопротивления камеры, т.е. $R \leq 20r$. Таким образом, диапазон значений резистора, включаемого последовательно с камерой, следует определять из соотношения: $L/0,3t_c \leq R \leq 20r$.

До сих пор рассматривался режим включения выключателя на КЗ. Но возможен случай, когда КЗ случается при ранее уже сомкнутых контактах параллельных камер (рис.4). При этом, разумеется, токи между ветвями сразу поделятся обратно-пропорционально их полным сопротивлениям [3]. Для нашего случая, когда $Z_1 = Z_2 = Z$, ток полюса должен поделиться поровну между ветвями. Это и подтверждается осциллограммой (рис.4), из которой видно, что ток полюса $I_o = 80$ кА разделится на две практически равные составляющие $I_1 = 37$ кА и $I_2 =$

41 кА. Причем каких-либо переходных процессов, как и следовало ожидать, не возникло, режим сразу стал установившимся.

Результаты испытаний в режиме отключения

При выполнении операции отключения возможны два случая. Первый – идеальный, но редкий случай практически одновременного (с разновременностью $\Delta t_2 < 1$ мс) размыкания контактов всех параллельных камер. При этом, как видно на примере синфазного размыкания контактов двух параллельных камер (рис.4), равномерное деление тока между камерами сохраняется до его прерывания при первом переходе через нулевое значение. Причем прерывание происходит в обеих камерах одновременно. Сохранение равномерности деления тока во время горения дуги в каждой из камер в данном случае обусловлено полной тождественностью и стабильностью положительных вольт-амперных характеристик вакуумных дуг в аксиальных магнитных полях межконтактных промежутков, длины которых измеряются также по одинаковым законам, если $\Delta t_2 < 1$ мс. Эта осциллограмма интересна еще тем, что ею документируется факт суммирования номинальных токов отключения камер при их параллельной работе: полюсом отключен ток $I_o = 80$ кА при номинальных токах отключения камер по 40 кА.

Второй, типичный случай, характеризуется разновременностью размыкания контактов параллельных камер $\Delta t_2 \geq 1$ мс. При такой разновременности наблюдается искажение первоначально равномерного деления тока между параллельными камерами [3].

Это можно видеть и на рис.2, где форма последних полуволн тока камеры существенно отличается от синусоидальной, характерной для тока макета в целом. Разновременность размыкания контактов камер в данном случае равна $\Delta t_2 = 2$ мс (рис.3). Искажение распределения тока возникает в результате возникновения дуги в первой из камер в момент t_1 , нарушения равенства полных сопротивлений токовых ветвей и перераспределения тока между ними. При этом постоянная времени τ переходного процесса по порядку значения не отличается от таковой при включении параллельными камерами тока КЗ, случая разобранного выше. После размыка-

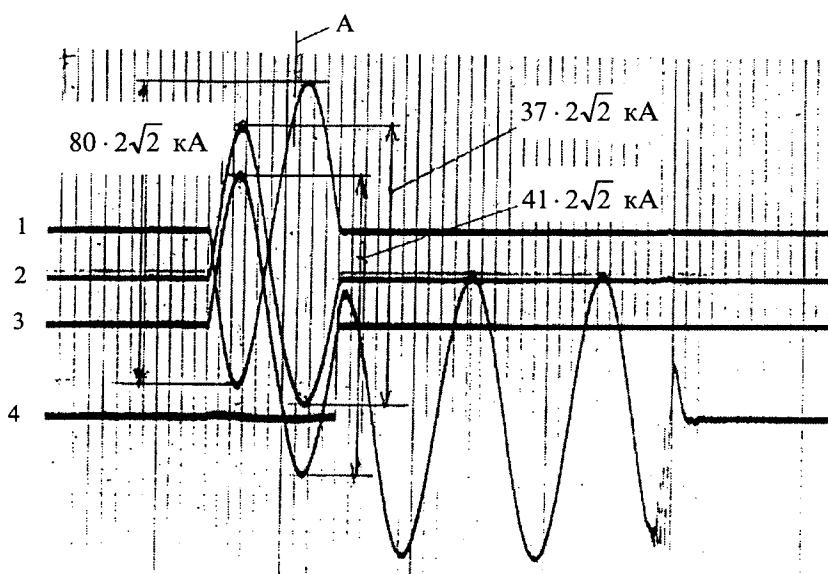


Рис.4. Осциллограмма отключения тока КЗ, прошедшего через предварительно замкнутые контакты двух параллельных камер:

1 – ток макета; 2, 3 – токи параллельных камер; 4 – восстанавливющееся на макете напряжение; для удобства чтения осциллограммы полярности записи токов макета и камер противоположны; A – момент размыкания контактов камер

ния контактов следующей камеры (момент t_2 на рис.2 и 3) и возникновения между ними дуги симметрия сопротивлений токовых ветвей практически восстанавливается и возобновляется процесс выравнивания тока между ветвями за счет стабилизирующей роли сопротивлений Z ветвей. Этот процесс также можно проследить на кривых 4 и 5 (рис.2).

Как отмечено, при наличии разновременности Δt_2 длины межконтактных промежутков камер также различны: $\Delta d = \Delta t_2 v$. Поэтому и длина дуги в первой из разомкнувшихся камер (камера 2) будет на Δd длиннее, чем в другой. Для поддержания в камере 2 более длинной дуги требуется на несколько вольт большее напряжение, чем в камере 1. Но его повышению в некоторой степени препятствует более короткая дуга камеры 1. В результате могут возникнуть условия, когда одновременное существование дуг в параллельных камерах окажется невозможным. Произойдет погасание более длинной дуги, т.е. дуги в камере 2. Именно это можно видеть на рис.3, кривая 3, где на доли миллисекунды раньше напряжение в камере 2 изменило знак с положительного на отрицательный, чем в камере 1. На рис.2 также отчетливо зафиксирован факт более раннего прерывания тока камерой 2 (кривая 4), чем камерой 1 (кривая 5). Таким образом, наличие разновременности Δt_2 при размыкании контактов приводит не только к искажению токораспределения между соединенными параллельно токовыми ветвями, а следовательно, и между параллельными камерами, но и к возможности разновременности моментов прерывания тока в параллельных камерах. Напомним, что при синфазном размыкании контактов этих явлений не наблюдается.

Рассмотренные детали процесса отключения тока параллельными камерами не влияют на отключающую способность полюса в целом, если выполняется главное условие. Оно состоит в том, что размыкание контактов параллельных камер должно произойти существенно раньше нуля тока полюса. В нашем случае упреждение должно быть не менее 3 мс. За это время длина межконтактных промежутков в момент прерыва-

ния тока при $v = 1$ м/с составит не менее 3 мм, они смогут удержать пик восстанавливающегося напряжения не менее 50 кВ, что обеспечит надежную работу выключателя во всех режимах. Более позднее размыкание контактов камер недопустимо, поскольку увеличивает вероятность повторных зажиганий и протекания тока полюса через пробившуюся камеру с катастрофическими последствиями. Ограничение времени самого позднего размыкания контактов камер 3 мс до нуля тока может быть снято при отключении нагрузок выключателя, не превышающих номинального тока отключения одной камеры.

Выводы

1. В вакуумном выключателе с параллельными камерами решена задача равномерного деления тока между камерами во всех режимах работы, в том числе при выполнении цикла "включено-отключено" при токе КЗ.

2. Наибольший пик тока в выключателе при включении может достигать значений $i_b = n i_{b, \text{ВДК}}$, а номинальный ток отключения выключателя $I_{\text{н.о.}} = 0,9n I_{\text{н.о.ВДК}}$, т.е. коммутируемый выключателем ток КЗ возрастает прямо пропорционально числу параллельных камер.

3. Потребности в генераторных выключателях с номинальными токами отключения до 100 кА и номинальными токами до 8000 А могут быть удовлетворены за счет вакуумных выключателей с использованием до 3 камер в каждом полюсе.

Список литературы

1. Пат. 3441800 США. 12 января 1967.
2. Каталог фирмы "Сименс" HG 11.11. 1996.
3. Перцев А.А. и др. Параллельное соединение нескольких вакуумных дугогасительных камер в полюсе выключателя // ТРАВЭК. Электротехника 2010. V симпозиум. 1999. Т.1. С.184–187.

Перцев Алексей Александрович – ведущий научный сотрудник ГУП ВЭИ им. В.И.Ленина, канд.техн. наук, Почетный машиностроитель. Окончил Всесоюзный заочный политехнический институт в 1957 г. Защищил кандидатскую диссертацию в 1966 г. по теме "Статическая электрическая прочность высоковольтных ртутных вентилей".

Комплектные устройства ОАО "Мосэлектроощит"

ЛЕГОСТОВ В.В., ДОРОШЕВ К.И.

Описаны новые и модернизированные изделия, производящиеся в ОАО «Московский завод «Электроощит», и характерные особенности отдельных элементов конструкций, влияющих на надежную эксплуатацию.

ОАО "Московский завод "Электроощит" в настоящее время изготавливает комплектные распределительные устройства напряжением от 3 до 12 кВ для всех видов электрических станций, включая газотурбинные на передвижных установках, а также электроподстанции энергосистем, промышленных предприятий, в том числе метрополитена, железнодорожного транспорта, коммунальных, городских, сельскохозяйственных электрических сетей и для любых других отраслей.

Изготавливаются комплектные устройства для повышения надежности и безопасной эксплуатации линий электропередач до 10 кВ. Они предназначены для автоматического ввода резерва (АВР), секционирования, плавки гололеда и для других целей по индивидуальным запросам конкретных заказчиков.

Изготавливаются комплектные экранирован-

ные токопроводы генераторного напряжения для генераторов любых мощностей, экранированные комплектные токопроводы для собственных нужд любых электростанций и для промышленных предприятий на напряжение от 0,4 до 12 кВ, а также токопроводы постоянного тока для электрических цепей рабочего и резервного возбуждения генераторов.

С 2001 г. завод приступил к серийному производству камер КСО-2001 МЭЩ.

Комплектные распределительные устройства (КРУ) внутренней установки серий К-104М (К-104МС1); К-105 (К-105С1)

Основные технические данные КРУ указанных серий приведены в таблице.

Шкафы КРУ указанных серий изготавливаются в климатическом исполнении для умеренного и тропического климата, а также в сейсмостойком исполнении для районов с сейсмич-

| Параметры | К-104М (К-104МС1) | К-105 (К-105С1) | К-XXVI | К-XXVII |
|---|--|--------------------|---|------------------|
| Номинальное напряжение, кВ | 3, 6, 10 | 3, 6, 10 | 3, 6, 10 | 3, 6, 10 |
| Наибольшее рабочее напряжение, кВ | 7,2; 12 | 7,2; 12 | 7,2; 12 | 7,2; 12 |
| Номинальный ток главных цепей шкафа, А | 630; 1000; 1600 | 2000; 2500; 3150 | 630; 1000; 1600 | 2000; 2500; 3150 |
| Номинальный ток сборных шин, А | 1600; 2000; 3150 | 2000; 3150 | 1600; 2000; 3150 | 2000; 3150 |
| Номинальный ток отключения выключателя, кА: | | | | |
| – элегазовых | 20; 31,5; 40 | 31,5; 40 | 20; 31,5 | – |
| – вакуумных | 20; 31,5 | 31,5 | 20; 31,5 | – |
| – маломасляных | 20; 31,5 | – | 20; 31,5 | 20; 31,5 |
| Номинальный ток термической стойкости (3 с) главных цепей, кА | 20; 31,5 | 31,5; 40 | 20; 31,5 | 20; 31,5 |
| Номинальный ток электродинамической стойкости, кА | 51; 81; 128 | 81; 128 | 51; 81 | 51; 81 |
| Типы выключателей: | | | | |
| – элегазовые | VF; LF ₂ ; ВГП; | HD4/GT | VF; LF ₂ | – |
| – вакуумные | ВВЭ-М-10; ВБПВ-10; ВВ/TEL-10; ВБЭК-10; ВБКЭ-10; ВБЭМ-10; ВБТЭ-10; ЭВОЛИС; | ВВЭ-М-10 | ВВТЭ-10; ВБЧЭ-10; ВВТП-10; ВВ/TEL-10 | – |
| – маломасляные | ВКЭ-М-10 | – | ВМПЭ-10 | ВМПЭ-10 |
| Вид обслуживания | | Двухстороннее | Одностороннее | |

ностью до 9 баллов по шкале MSK-64.

Большое разнообразие схем главных и вспомогательных электрических цепей делает возможным применение шкафов КРУ в распределительных устройствах любых предприятий, вырабатывающих и потребляющих электрическую энергию.

Наличие в шкафах КРУ защиты от электроударов КЗ каждого отсека позволяет обеспечить надежную безопасную работу распределительных устройств с одновременным сокращением эксплуатационных расходов за счет применения основных аппаратов выключателей, допускающих большой механический ресурс работы, а также большое количество отключений токов КЗ без ревизий.

Применение в шкафах КРУ вакуумных и газовых выключателей резко сокращает трудозатраты на монтаж, наладку и регулировку КРУ в целом и тем самым сокращает сроки ввода энергетических мощностей в эксплуатацию.

Поставка с завода шкафов КРУ транспортируемыми блоками по три шкафа, состыкованных между собой, с проложенными оперативными шинками, шинками питания приводов выключателей и с присоединенными к ним ответвлениями для каждого шкафа, исключает дополнительный объем работ, которым приходится заниматься монтажным и наладочным организациям.

Расположение отсеков сборных шин в шкафах КРУ К-104М (К-104МС1) и К-105 (К-105С1) внизу, а линейных отсеков над ними значительно облегчает работу эксплуатационного персонала. Создаются удобные условия работы в линейном отсеке, где, как правило, располагаются измерительные трансформаторы тока (иногда по две группы в каждой фазе), заземляющие разъединители, ограничители перенапряжения, трансформаторы тока для защиты от замыканий на землю, разделки силовых кабелей и кабельные присоединения к электрическим аппаратам.

Сборно-разборная конструкция шкафов обеспечивает легкий доступ в отсек сборных шин и не вызывает каких-либо затруднений при прокладке сборных шин даже в стесненных помещениях распределустройства.

Применение трехстороннего фиксатора выкатного элемента в корпусе шкафа КРУ обеспечивает надежную работу шкафа КРУ при отключении полных токов КЗ и при землетрясениях, так как выкатной элемент фиксируется двумя боковыми фиксаторами и одним нижним фиксатором, которые управляются одной рукояткой

только при отключенном выключателе и при нахождении выкатного элемента в рабочем или контролльном положениях.

Такое исполнение фиксации выкатного элемента в корпусе шкафа с соответствующими механическими блокировками, не позволяющими выкатить выкатной элемент с включенным выключателем из зафиксированного рабочего или контролльного положения шкафа КРУ или наоборот вкатить выкатной элемент с включенным выключателем в корпус шкафа обеспечивает и гарантирует полную безопасность работы эксплуатирующего персонала.

В шкафах КРУ с выключателями оригинально выполнена конструкция разъединяющих контактов главной цепи. Неподвижный контакт расположен в проходном изоляторе и его штырь, на который заходит розетка неподвижного контакта, имеет отверстие, через которое вставляется шток с нанесенными рисками, указывающий размер захода подвижного контакта на неподвижный. Регулировка захода выполняется путем подачи этого штыря вперед или назад в зависимости от указаний нанесенных рисок на штоке.

Наличие ламп освещения с выключателем в релейном шкафу и ламп освещения на задней стенке каждого третьего шкафа КРУ для освещения коридора обслуживания улучшает условия работы в релейном шкафу, отсеках линейном и сборных шин, в коридоре обслуживания. При работе в одном шкафу можно отключить освещение в других шкафах, где оно не требуется.

В релейном шкафу на дверях и поворотном приборном блоке широко применяются микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики серий SPAC, БМРЗ, БМАЧР, SEPAM, SPAM, "Сириус" и др., а также аппаратура управления фирм "Siemens", "Хартинг", "Феникс-контакт" и любая другая по желанию заказчика. Устройства релейной защиты и автоматики также могут быть выполнены с помощью электромеханических реле.

Степень защиты изготавливаемых шкафов КРУ в соответствии с требованиями ГОСТ 14254-96 может быть IP20, IP40 и IP41.

В комплекте со шкафами КРУ завод поставляет:

- шинные мосты, связывающие сборные шины шкафов одной секции, расположенной в два ряда, для коридоров между рядами шкафов, начиная от 1500 до 3700 мм, с интервалом через каждые 100 мм;
- шинные вводы от силовых трансформатор-

ров до вводного шкафа КРУ или от стены помещения до вводного шкафа КРУ;

– отдельные (навесные) релейные шкафы для размещения дополнительной аппаратуры вспомогательных цепей, например, аппаратуры питания и секционирования оперативных шинок и шинок питания приводов выключателей, аппаратуры групповой автоматической частотной разгрузки (АЧР) и др.;

– инвентарные тележки, служащие для замера сопротивления и прозвонки присоединений силовых кабелей, а также используемые вне шкафов КРУ как рабочие столы с фиксацией на полу для удобства работы с приводами выключателей, расположеннымными внизу выключателя;

– фазировочные тележки для обеспечения правильного подключения жил каждой фазы силовых кабелей.

За счет хорошо налаженной обратной связи с постоянными заказчиками завод систематически работает над совершенствованием конструкции отдельных элементов КРУ и в настоящее время имеет возможность применять выкатные элементы с любым вакуумным выключателем, изготавливаемым на заводах Российской Федерации, а также вакуумные выключатели серии "ЭВОЛИС" французской фирмы "Schneider Electric". Элегазовые выключатели серий VF; HD4/GT, применяемые в шкафах КРУ, изготавливаются на территории завода совместным предприятием "АББ Мосэлектроощит". В шкафах КРУ также применяются элегазовые выключатели серий LF₂ и LF₃ производства французской фирмы "Schneider Electric".

В шкафах КРУ широко применяются измерительные трансформаторы тока, рассчитанные на полный ток КЗ, начиная от 50/5 А до номинального тока шкафа КРУ. При токах от 600/5 А могут применяться трансформаторы тока с тремя вторичными обмотками классов 0,5; 10P и 10R. Применяются трансформаторы тока с вторичным током 1 А.

Все более широко используются трансформаторы напряжения литого исполнения со встроенными предохранителями, причем имеются исполнения предохранителей с индикатором срабатывания плавкой вставки (стреляющие предохранители).

В сетке схем главных цепей, изготавливаемых КРУ, нашли широкое применение шкафы для газотурбинных электростанций (ГТЭС) мощностью от 1,5 до 12 МВт; шкафы КРУ для защиты оборудования от перенапряжений при однофазных КЗ (шкафы ШЗН, номер схемы главных це-

лей 318); шкафы с RC-цепями для защиты оборудования от коммутационных и грозовых перенапряжений, причем имеется исполнение для установки этих шкафов непосредственно у потребителя; шкафы с силовыми трансформаторами мощностью до 40 кВ·А; шкафы для размещения схем только с аппаратурой вспомогательных цепей и др.

Для расширяемых объектов, в распредустройствах которых применены шкафы КРУ ранее изготавливаемых серий других предприятий, завод имеет возможность изготовить одновременно со шкафами КРУ серии К-104М и К-105 переходные шкафы для их непосредственнойстыковки с существующими шкафами.

Комплектные распределительные устройства К-XXVI и К-XXVII

Для расширения объектов распределительных устройств, на которых установлены шкафы КРУ ранее изготовленных серий К-XXVI, К-XXVII или КРУ-210-20, завод изготавливает КРУ серий К-XXVI и К-XXVII. Основные технические данные КРУ приведены в табл.1.

При расширении распредустройств, состоящих из шкафов КРУ-210-20, рядом стоящий новый шкаф КРУ серии К-XXVI изготавливается со специальным отсеком сборных шин, позволяющим стыковать их непосредственно, без каких-либо переходных промежутков.

Выкатные элементы для модернизации КРУ, находящихся в эксплуатации

Для замены вышедших из строя или выработавших свой ресурс выключателей завод изготавливает выкатные элементы с новыми вакуумными или элегазовыми выключателями. При замене выкатных элементов в существующих у заказчика КРУ применение новых выключателей обеспечивает продление срока службы КРУ еще на 25 лет.

Новые выкатные элементы изготавливаются для КРУ серий: "К"; К-II; К-III; К-IV; К-III'; К-VIII; К-IX; К-X; К-XII; К-XXI; К-XXV; К-XXVI, а также для КРУ-26 и КРУ-210 на те же электрические параметры, что и существующие шкафы КРУ.

Для КРУ серий КРУ-26 и КРУ-210 с возможностью обслуживания этих КРУ с задней стороны завод выпускает выкатные элементы, установленные в металлической кассете со своим механизмом доводки, блокировки, заземляющим разъединителем, трансформаторами тока и даже по желанию заказчика с новым релейным шкафом.

При изготовлении новых выкатных элементов завод имеет возможность по просьбе заказ-

чика поставить комплектно фотодатчики для защиты какого-либо отсека шкафа КРУ от электродуговых КЗ или также в комплекте поставить новый релейный шкаф с современными схемами релейной защиты и автоматики. При поставке нового релейного шкафа в комплекте с выкатным элементом на объекте не требуется выполнять дополнительно каких-либо работ по адаптации схемы управления новых выключателей.

Камеры сборные одностороннего обслуживания серии КСО-2001 МЭЩ

Основные технические данные КСО-2001 МЭЩ

| | | |
|--|---------------|----------------|
| Номинальное напряжение, кВ | ..... | 6; 10 |
| Наибольшее рабочее напряжение, кВ | ..... | 7,2; 12 |
| Номинальный ток камер с вакуумными выключателями, А | ..... | 630; 1000 |
| Номинальный ток отключения вакуумного выключателя, кА | ..... | 12,5; 20 |
| Номинальный ток электротермической стойкости, кА | ..... | 20 |
| Номинальный ток электротермической стойкости, кА | ..... | 31,5; 51 |
| Номинальный ток камер с выключателями нагрузки, А | ..... | 400; 630 |
| Номинальный ток отключения выключателя нагрузки, А | ..... | 400; 630 |
| Номинальный ток электротермической стойкости камер с выключателями нагрузки, кА | ..... | 20; 31,5 |
| Номинальный ток электродинамической стойкости камер с выключателями нагрузки, кА | ..... | 51; 81 |
| Время протекания тока термической стойкости, с: | | |
| – главных цепей | ..... | 3 |
| – заземляющих ножей | ..... | 1 |
| Тип вакуумных выключателей | BB/TEL; BBЭМ; | |
| | ЭВОЛИС | |
| Тип элегазовых выключателей | ..... | LF1 |
| Тип трансформаторов собственных нужд | ..... | TM-25; ТСКС-40 |

Камеры КСО-2001 МЭЩ изготавливаются в двух исполнениях:

Вариант 1 (рис.1) – камеры, рассчитанные для замены существующих или длястыковки с существующими камерами КСО-2УМ3; КСО-272; КСО-285; КСО-292.

Вариант 2 (рис.2) – камеры для вновь строящихся объектов распределительных устройств.

Оба варианта камер имеют открытую сверху установку сборных шин и шинного разъединителя, которые отгорожены от другой аппаратуры главных цепей глухой металлической перегородкой.

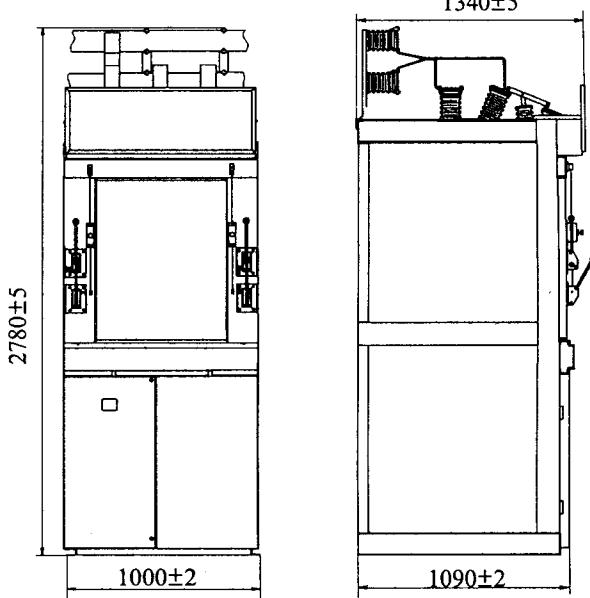


Рис.1. Габаритные размеры камеры КСО-2001 МЭЩ (вариант 1) с вакуумным выключателем

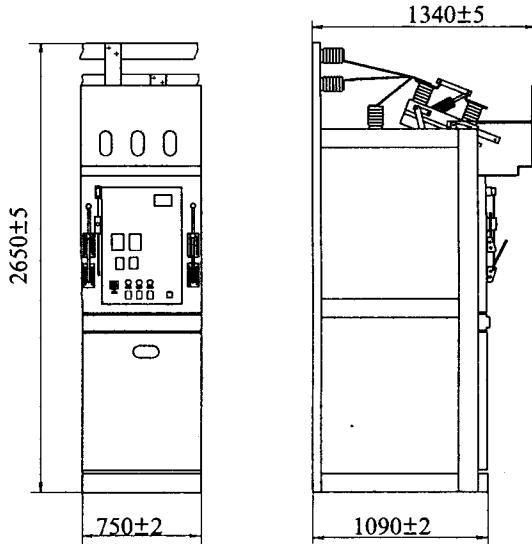


Рис.2. Габаритные размеры камеры КСО-2001 МЭЩ (вариант 2) с вакуумным выключателем

Аппаратура вспомогательных цепей установлена в отдельном отсеке, а аппаратура управления, измерения, сигнализации устанавливается на поворотной двери, закрывающей отсек аппаратуры вспомогательных цепей.

При размещении камер КСО-2001 МЭЩ в два ряда комплектно изготавливаются шинные мосты для прохода между рядами от 1800 до 4300 мм. Шинные мосты могут быть как с секционным разъединителем, так и без него.

Комплектные устройства для повышения надежности работы ЛЭП 6–10 кВ

Для повышения надежности работы линий

электропередач напряжением 6 и 10 кВ изготавливаются комплектные устройства типа К-112, которые могут использоваться в электрических сетях для секционирования, автоматического ввода резерва, плавки гололеда и в некоторых других целях.

В устройствах применены вакуумные выключатели ВВ/TEL-10 (производства "ТавридаЭлектрик", г. Москва), ВБЭМ-10-12,5/800 (производства ГНПП "Контакт", г. Саратов), ВБСК-10-10/630 (производства ОАО "Электрокомплекс", г. Минусинск).

Эти же устройства могут быть использованы как шкафы секционирования между двумя комплектными трансформаторными подстанциями, а также как отходящие линии, в этом случае в них могут быть установлены счетчики учета расхода электроэнергии.

Комплектные токопроводы

Другим направлением деятельности завода является изготовление комплектных экранированных токопроводов генераторного напряжения для генераторов любого исполнения, любой мощности до 1500 МВт. Номинальное напряжение генераторных токопроводов от 10 до 24 кВ, номинальный ток до 31500 А.

Вместе с генераторными токопроводами изготавливаются комплектные закрытые токопроводы собственных нужд номинальным напряжением от 0,4 до 12 кВ, с номинальным током от 1600 до 4000 А, током электродинамической стойкости до 180 кА при 6 кВ и до 250 кА при 10 кВ.

Токопроводы 0,4 кВ имеют номинальный ток 1600 А, ток электродинамической стойкости 51 кА.

Токопроводы постоянного тока типа ШЗК-1,2 номинальным напряжением 1,2 кВ изготавливаются на номинальные токи до 6300 А, ток электродинамической стойкости до 128 кА.

Токопроводы генераторного напряжения вы-

пускаются в пофазноэкранированном исполнении с непрерывными экранами с естественной вентиляцией для генераторов мощностью 500 МВт и с установкой принудительной вентиляции для генераторов единичной мощностью 800 МВт и выше.

Токопроводы 6–10 кВ изготавливаются в пофазноэкранированном исполнении или в общей оболочке с разделёнными перегородками между фазами или без перегородок.

Имея большой опыт работы в системе Минэнерго СССР и РФ и получая по обратной связи от монтажных, наладочных и эксплуатационных организаций конкретные предложения и пожелания, коллектив завода постоянно проводит работы по повышению надежности и безопасности выпускаемых изделий, а также расширению номенклатуры изделий завода.

Приглашаем представителей заказчиков, проектных и эксплуатирующих организаций, которым нужны надежные электротехнические устройства и аппараты, посетить наше предприятие для ознакомления с производством, технологическими возможностями и с возможностями изготовления изделий в минимальные сроки.



Легостов Владимир Викторович – исполнительный директор ОАО "Московский завод "Электроощит", заслуженный машиностроитель РФ. Окончил в 1968 г. Московское высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана.



Дорошев Ким Ильич – главный конструктор ОАО "Московский завод "Электроощит", заслуженный конструктор РСФСР. Окончил в 1958 г. Всесоюзный заочный энергетический институт.

Однофазные вакуумные контакторы постоянного и переменного тока

АЛФЁРОВ Д.Ф., БУДОВСКИЙ А.И., ИВАНОВ В.П., ИВАНОВ Ю.В., СИДОРОВ В.А.

Описаны серийные однофазные вакуумные контакторы переменного тока на напряжение до 3 кВ, номинальный ток 100, 500 и 1500 А с отключающей способностью до 5 кА. Предложена оригинальная схема вакуумного контактора постоянного тока с поперечным магнитным полем на рабочее напряжение до 4 кВ. Из результатов испытаний следует, что вакуумный контактор с поперечным магнитным полем способен отключать постоянный ток до 100 А.

Для переключения силовых и вспомогательных цепей на подвижном составе электрифицированного железнодорожного транспорта до настоящего времени применяются коммутационные аппараты электромагнитного типа с гашением дуги в деионизационных решетках, которые отличаются наличием открытой электрической дуги. Такие аппараты обладают низкой надежностью, недостаточной коммутационной износостойкостью и высокой стоимостью затрат на обслуживание. Они характеризуются значительным рассеиванием энергии в дуге с повышенным уровнем акустических шумов и радиопомех, а также выделением токсичных и химически активных веществ при горении дуги, и как следствие этого, быстрым износом контактов и частой их заменой.

Применение вакуумных переключателей, в которых для отключения переменного тока используется вакуумная дугогасительная камера (ВДК), позволяет устранить многие из недостатков, присущих открытой электрической дуге [1, 2]. В таких аппаратах коммутация тока осуществляется в герметизированном вакуумном объеме, что позволяет значительно уменьшить падение напряжения на дуге, снизить таким образом энергетические потери и, как следствие, получить высокий коммутационный и механический ресурс.

Вакуумные переключатели обладают:

- высокой надежностью и быстродействием;
- пожаро- и взрывобезопасностью;
- удобством в эксплуатации;
- экологической чистотой в эксплуатации и производстве.

Сравнительно малый (2–4 мм) ход контактов в ВДК позволяет наиболее эффективно использовать электромагнитный привод и, как следствие, существенно уменьшить массогабаритные показатели контактора.

The serial single-phase ac vacuum contactors with ratings up to 3 kV, rated current 100, 500 and 1500 A and switching ability up to 5 kA are described. The original design of a dc vacuum contactor with a transverse magnetic field for working voltage up to 4 kV is offered. It follows from the test results, that the vacuum contactor with a transverse magnetic field is capable to break (switch-off) a direct current up to 100 A.

Вакуумные контакторы переменного тока

Однофазные вакуумные контакторы типа КВО могут коммутировать номинальный переменный ток 500 и 1500 А с отключающей способностью до 5000 А при номинальном напряжении 3 кВ [2]. Технические характеристики контакторов приведены в таблице.

Все вакуумные контакторы типа КВО имеют однотипную компоновку (рис.1). Они содержат изоляционный цилиндрический корпус 1, вдоль оси которого размещены ВДК 2, тяговый изолятор 3 и электромагнит с якорем 4. На торце электромагнита установлен конус 5, упирающийся в конус 6, который закреплен на корпусе контактора. Указанные конусы предназначены для демпфирования колебаний контактов ВДК при отключении. Внутри электромагнита компактно размещены пружины отключения 7 и поджатия 8 контактов ВДК. Якорь электромагнита упруго связан с двумя парами нормально замкнутых и разомкнутых контактов микропреключателей 9.

Электронная схема управления 10 расположена на опорной пластине 11, на которой закреплен корпус с помощью изоляционной стойки 12 и металлической стойки 13. Внешняя изоляция ВДК, как правило, усиливается путем заливки кремнийорганического компаунда 14 в зазор между камерой и цилиндрическим корпусом.

Электромагнитный привод может питаться как от постоянного, так и от переменного выпрямленного напряжения. Предложенная в [3] схема включения и удержания контактора во включенном положении выполнена на транзисторном ключе с уставкой по времени и по положению якоря электромагнита при переключении с пускового режима в режим удержания. Ток удержания ограничивается дополнительным резистором, включенным последовательно с катушкой электромагнита. Помимо схемы удержания

| Параметр | КВО-3-0,1/50 | КВО-3-4/500 | КВО-3-5/1500 |
|--|----------------|-------------|----------------|
| Номинальный ток, А | 50 | 500 | 1500 |
| Номинальное напряжение, В | 3000 | 3000 | 3000 |
| Номинальная частота, Гц | пост. ток | 50–60 | 50–60 |
| Номинальный ток отключения, кА | 0,1* | 4 | 5 |
| Ток динамической стойкости, кА | 30 | 30 | 50 |
| Время включения, не более, мс | 100 | 100 | 100 |
| Время отключения, не более, мс | 80 | 80 | 80 |
| Механический ресурс, циклов ВО | $2 \cdot 10^6$ | 10^6 | 10^6 |
| Электрический ресурс контактов при номинальном токе, циклов ВО | 10^6 | 10^5 | $5 \cdot 10^4$ |
| Размеры однополюсного контактора, мм: | | | |
| – длина | 302 | 302 | 255 |
| – ширина | 97 | 97 | 130 |
| – высота | 225 | 185 | 405 |
| Масса, кг | 6,3 | 6 | 17 |

* В диапазоне частот 50–60 Гц номинальный ток отключения составляет 1–2 кА.

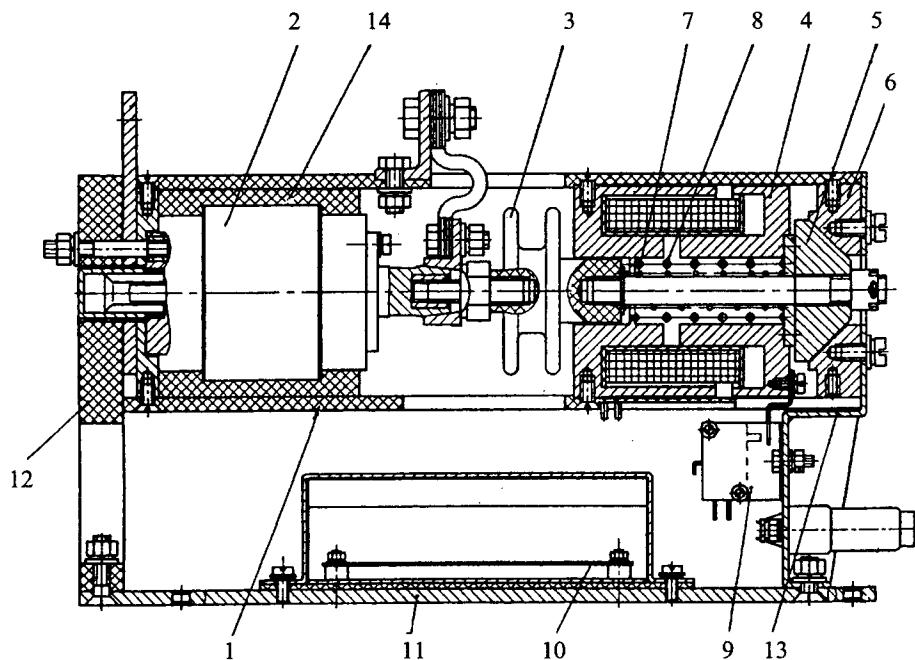


Рис.1. Конструкция вакуумного контактора

с балластным сопротивлением в настоящее время разработана и внедрена оригинальная схема с полевым транзистором, в которой стабилизация тока удержания осуществляется с помощью широтно-импульсного регулятора (ШИР). Такое решение позволяет существенно уменьшить (более чем на порядок) потребление энергии в режиме удержания по сравнению со схемой на балластных сопротивлениях [4].

Структурная схема блока управления показана на рис.2. При подаче сигнала тока управления $I_{\text{упр}}$ на вход узла пуска-останова запускается таймер, который в течение 0,1 с подает постоянное напряжение на затвор транзистора, достаточное для его полного насыщения, и запрещает прохождение формируемых модулятором импульсов ШИР. В результате обмотка привода включается на полное напряжение питания $U_{\text{пит}}$, что обеспечивает протекание пускового тока. Через 0,1 с таймер выключается, на ШИР поступают импульсы управления, формируемые модулятором, после чего начи-

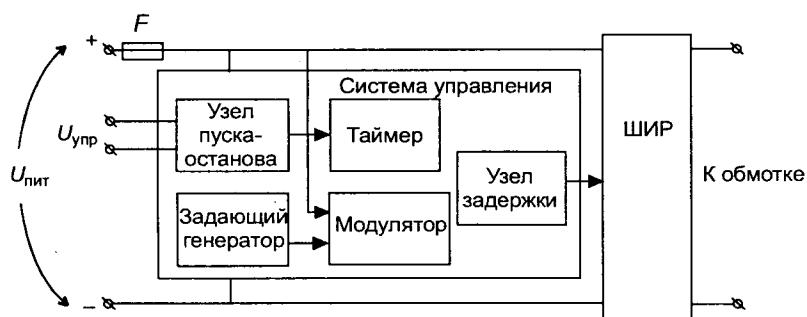


Рис.2. Структурная схема блока управления

нается регулирование напряжения на обмотке электромагнита, чем и обеспечивается требуемый ток удержания.

Перейти на более высокий класс напряжения контакторов можно, не изменяя его компоновку, а лишь заменив ВДК на камеру с более высоким напряжением и усилив изоляцию опорного и тягового изоляторов.

Вакуумный контактор постоянного тока

Для отключения постоянного тока в вакуумном выключателе обычно используется принцип принудительного перевода тока в ВДК через нуль с помощью разряда предварительно заряженного конденсатора [5]. Такие выключатели способны отключать токи до нескольких десятков килоампер при напряжении до 100 кВ и более [6]. При отключении токов до 1000 А и сравнительно небольших напряжениях до 3 кВ представляется перспективным использование также и гибридного коммутатора, состоящего из вакуумного контактора и подсоединенного параллельно ему силового полупроводникового прибора (СПП), например запираемого тиристора [7]. В таком устройстве отключение тока осуществляется с помощью СПП, который включается перед разведением контактов ВДК и отключается сразу после их разведения. В этом случае СПП и ВДК работают в режиме минимальной токовой нагрузки, что позволяет значительно увеличить их срок службы. Однако при отключении сравнительно малых токов до 100 А сложность конструкции, сравнительно большие габаритные размеры и стоимость таких аппаратов зачастую снижают их конкурентоспособность по сравнению с другими типами переключателей.

Другой способ отключения постоянного тока, который реализуется, например, в электромагнитных выключателях, заключается в создании условий для повышения напряжения на дугогасительном устройстве до уровня, превышающего напряжение на источнике питания. В ВДК такие условия можно создать путем формирования в межконтактном промежутке попечерного относительно направления тока магнитного поля [8]. Поперечное магнитное поле нарушает устойчивость горения вакуумной дуги, что приводит к быстрому росту напряжения на вакуумном промежутке и обрыву тока в ВДК.

В [9] предложена оригинальная конструкция ВДК с поперечным магнитным полем, в которой формируется осесимметричное радиальное магнитное поле с помощью постоянного магнита. На основе этой камеры разработан и изготовлен вакуумный контактор постоянного тока

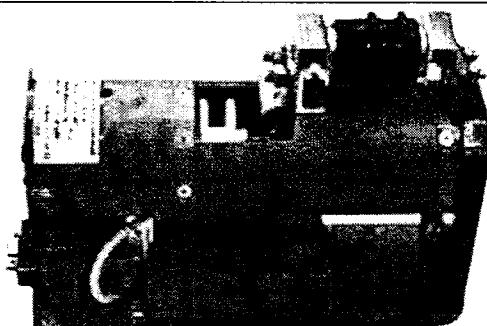


Рис.3. Вакуумный контактор постоянного тока

типа КВО-3-0,1/50 (таблица).

Исполнение вакуумного контактора постоянного тока (рис.3) отличается от контакторов переменного тока конструкцией ВДК и наличием нелинейного резистора R_1 , который служит для ограничения уровня восстанавливавшегося напряжения и поглощения энергии при отключении тока в ВДК.

Нелинейный резистор закреплен непосредственно на токовыводах контактора. Параллельно нелинейному резистору может подсоединяться керамический конденсатор емкостью $C_1 \sim 10 \div 20 \text{ нФ}$.

ВДК содержит постоянный магнит, который формирует в межконтактном промежутке азимутально-однородное и преимущественно радиальное магнитное поле. Данная ВДК позволяет существенно уменьшить массогабаритные характеристики и стоимость контактора по сравнению с другими известными типами вакуумных контакторов.

Испытания вакуумного контактора постоянного тока

Контактор работает следующим образом. При операции "В" замыкаются контакты Q_1 с помощью электромагнитного привода Y_1 , и через контактор протекает ток от источника питания к нагрузке. При операции "О" управление на привод отключается, происходит размыкание контактов ВДК и в межконтактном промежутке возникает вакуумная дуга, которая горит в поперечно-радиальном магнитном поле. Такое поле способствует эффективному погасанию вакуумной дуги постоянного тока, и ток переходит в нелинейный резистор. Для ограничения скорости восстановления напряжения в ряде случаев параллельно ВДК подсоединяется конденсатор C_1 .

Испытания контактора на отключающую способность постоянного тока проводились на сильноточном импульсном стенде (рис.4), состо-

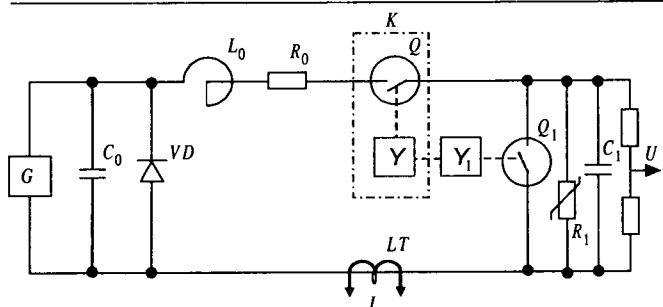


Рис.4. Схема сильноточного импульсного стенда

ящем из источника питания G , конденсаторной батареи емкостью $C_0 = 12,4 \text{ мФ}$ на максимальное напряжение 3 кВ и реактора с индуктивностью $L_0 = 6 \text{ мГн}$. Конденсаторная батарея содержит восемь соединенных параллельно идентичных блоков, шунтированных диодами VD . Для ограничения тока использовался резистор $R_0 = 10 \Omega$.

Испытуемый контактор (Q_1 , Y_1) подключался к стенду с помощью серийного контактора K типа КВО (Q , Y). В начальный момент контакты в камере Q_1 были замкнуты, а контакты в камере Q разомкнуты. После зарядки конденсаторной батареи C_0 до заданного напряжения U_0 , подается команда на включение контактора K . В момент замыкания контактов в Q подается импульс управления на разведение контактов в Q_1 . Контакты разводились на расстояние примерно 2–4 мм за время 2–7 мс. В процессе испытаний измерялись ток I с помощью датчика тока LT-500-S/SP53 и напряжение U на Q_1 с помощью омического делителя. Электрические сигналы регистрировались на цифровом осциллографе с последующей записью на ПК.

Испытания проводились при $U_0 = 200\text{--}2800 \text{ В}$ в диапазоне токов 15 – 300 А. Параллельно Q_1 подсоединенна емкость $C_1 = 10 \text{ нФ}$. Типичные для этого режима осциллограммы тока I и напряжения U , полученные при $U_0 = 1400 \text{ В}$, представлены на рис.5. При включении контактора K в камере Q_1 начинает протекать ток, который примерно через 3 мс достигает максимального значения, а затем медленно спадает с постоянной времени RC около 125 мс. Напряжение на Q_1 равно нулю. В момент t_1 начинают расходиться контакты в камере Q_1 , и на ней появляется напряжение, которое вначале плавно нарастает с 20 до 35–40 В. Все это время от t_1 до t_2 вакуумная дуга в Q_1 горит устойчиво без заметных всплесков напряжения. В момент t_2 дуга быстро переходит в неустойчивую стадию, которая про-

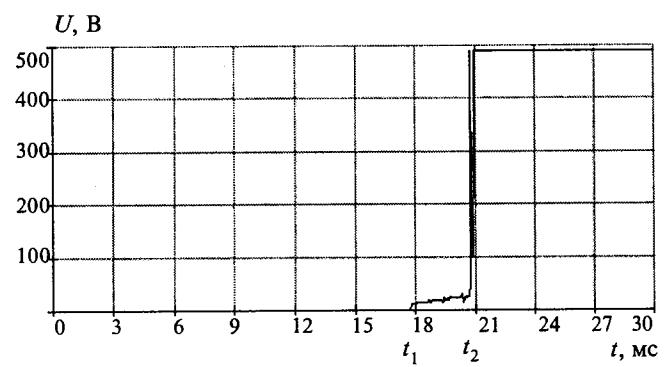
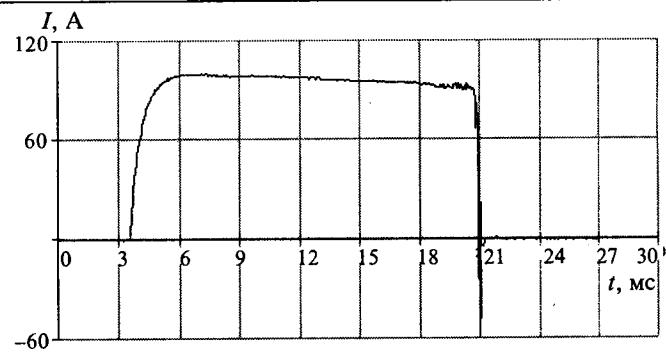


Рис.5. Осциллограммы тока и падения напряжения на вакуумной дуге

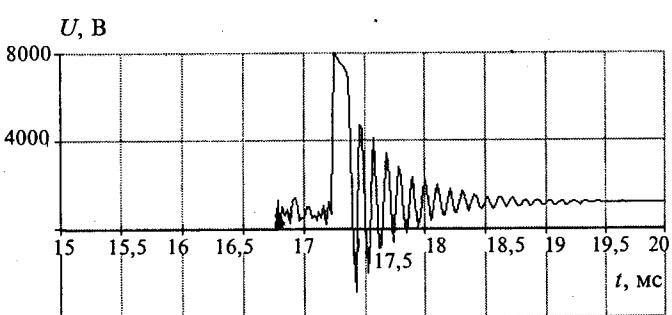
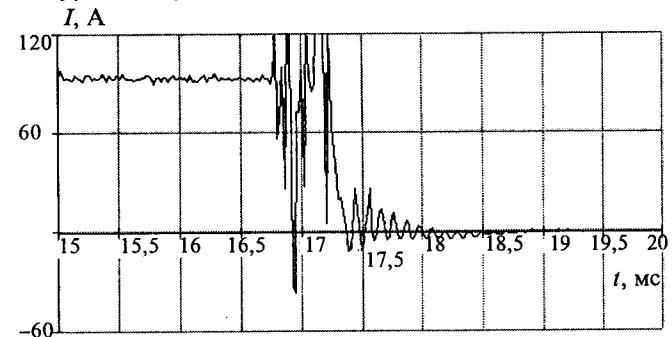


Рис.6. Осциллограммы тока и напряжения на контакторе

является в виде резкого нарастания напряжения и обрыва тока в Q_1 .

Более детально процесс отключения тока можно проследить на осциллограммах, представленных на рис.6. Видно, что развитие неустойчивой фазы горения вакуумной дуги сопровождается заметными всплесками напряжения и кратковременными обрывами тока вплоть до полного погасания дуги. В этот момент на Q_1

восстанавливается напряжение $U \sim L_0 dI/dt$, которое ограничивается нелинейным резистором R_1 на уровне примерно 8 кВ. Затем емкость C_1 быстро разряжается в цепи основного колебательного контура до уровня остаточного напряжения на конденсаторной батарее C_0 .

При максимальном расстоянии между контактами около 2 мм испытуемый контактор отключает ток $I \approx 100$ А, среднее время устойчивого горения дуги $t_d = t_2 - t_1 \approx 2,9$ мс, а средняя длительность неустойчивой фазы примерно 3,5 мс. При увеличении отключаемого тока до 150 А время t_d возрастает примерно в два раза. Максимальный отключаемый ток около 140 А при $C_1 = 10$ нФ. При более высоких значениях тока иногда наблюдается затягивание времени горения дуги до тех пор, пока ток не спадет до уровня 130–140 А.

С увеличением максимального расстояния между контактами до 4 мм среднее время t_d устойчивого горения дуги возрастает до 12 мс при отключаемом токе 100 А, а длительность неустойчивой фазы сокращается до 1–2 мс. Средний ток отключения в этом режиме примерно 140 А, а максимальный отключаемый ток около 160 А.

Более детально отключающая способность ВДК с радиальным магнитным полем при различных значениях индукции магнитного поля $B_r = 40 \div 160$ мТл и шунтирующей ВДК емкости $C_1 < 5$ мкФ исследовалась в [10]. Отключающая способность ВДК по постоянному току возрасала с увеличением B_r и C_1 , и среднее значение отключаемого тока при $B_r = 160$ мТл и $C_1 = 5$ мкФ составило примерно 350 А.

Вакуумный контактор постоянного тока типа КВО-3-0,1/50 выдержал испытания на испытательном стенде ВНИИЖТ в режиме коммутации постоянного тока 9,6–56 А в цепи с индуктивностью 33 мГн при напряжении сети 3,9 кВ, что соответствует параметрам цепей отопления нового электропоезда ЭД-6.

Список литературы

1. Иванов В.П., Алфёров Д.Ф., Будовский А.И., Сидоров В.А. Применение вакуумных выключателей для коммутации цепей постоянного и переменного тока на подвижном составе железнодорожного транспорта // Электротехника. 1998. №11. С.41–46.

2. Алфёров Д.Ф., Будовский А.И., Иванов В.П. и др. Новое поколение вакуумных коммутационных аппаратов для

железнодорожного транспорта // Труды 5-го симпозиума "Электротехника 2010". 1999. С.161.

3. Пат. 2074430 РФ. Устройство электромагнитного привода коммутационного аппарата / А.И. Будовский, В.П. Иванов // Открытия. Изобретения. 1997. №6.

4. Пат. 2195732 РФ. Устройство форсированного электромагнитного привода коммутационного аппарата / А.И. Будовский, В.П. Иванов // Открытия. Изобретения. 2002. №36.

5. Вакуумные дуги. Теория и приложения / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982.

6. Алфёров Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Сильноточные вакуумные коммутирующие устройства для мощных накопителей энергии // ПТЭ. 1998. №5. С.83–90.

7. Алфёров Д.Ф., Ермилов И.В., Иванов В.П. Высоковольтный сильноточный выключатель постоянного тока // Электричество. 2001. №11. С.14–19.

8. Emtage P.R., Kimblin C.W., Gorman J.G. et al. Interaction between vacuum arcs and transverse magnetic fields with application to current limitation // IEEE Trans. Plasma Sci. 1980. Vol. 8, № 4. P.314-319.

9. Алфёров Д.Ф., Гостиев В.Г., Иванов В.П. и др. Вакуумные контакторы постоянного и переменного тока для железнодорожного транспорта // Труды VI симпозиума "Электротехника 2010". 2001. С.75–78; Сборник научных трудов ВЭИ под ред. В. Д. Ковалева, Москва, 2001. С.16–22.

10. Alferov D.F., Ivanov V.P., Sidorov V.A. Characteristics of DC Vacuum Arc in the Transverse Axially Symmetric Magnetic Field // Proc. of XX-th ISDEIV, Tour. 2002. P.198–201.

Алфёров Дмитрий Фёдорович – ведущий научный сотрудник ГУП "ВЭИ", канд. физ.-мат. наук. Окончил факультет автоматики и телемеханики Московского инженерно-физического института в 1969 г. Защитил диссертацию по теме "Некоторые вопросы теоретического и экспериментального исследования основных характеристик источников ондуляторного излучения" в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР в 1979 г.

Будовский Александр Исаакович – старший научных сотрудник ГУП "ВЭИ". Окончил энергомашиностроительный факультет МЭИ в 1962 г.

Иванов Валерий Павлович – начальник сектора ГУП "ВЭИ". Окончил факультет "Электрические сети и системы" МЭИ в 1972 г.

Иванов Юрий Валерьевич – инженер ГУП "ВЭИ". Окончил физико-технический факультет Московского государственного технологического университета (МГТУ "Станкин") в 2000 г.

Сидоров Владимир Алексеевич – ведущий научный сотрудник ГУП "ВЭИ", канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1974 г. Защитил диссертацию по теме "Исследование и разработка вакуумных управляемых разрядников отпаянной конструкции для импульсных источников энергии" в ВЭИ в 1990 г.

Сильноточный быстродействующий короткозамыкатель

АЛФЁРОВ Д.Ф., БУДОВСКИЙ А.И., ИВАНОВ В.П., СИДОРОВ В.А.

Разработано, изготовлено и испытано быстродействующее сильноточное коммутирующее устройство, предназначенное для защиты оборудования от воздействия аварийных токов до 30 кА длительностью до 2 с. Устройство состоит из управляемого вакуумного разрядника типа РВУ-43, параллельно подключенного к нему вакуумного контактора с электромагнитным приводом и блока управления. Устройство устанавливается параллельно защищаемому объекту и обеспечивает его шунтирование в аварийном режиме.

Защита дорогостоящего электрооборудования от разрушений при воздействии аварийных токов или перенапряжений осуществляется в основном путём шунтирования этого оборудования быстродействующим короткозамыкателем. При аварийных токах, превышающих десятки килоампер с длительностями до десятков миллисекунд, в качестве сильноточного быстродействующего короткозамыкателя весьма перспективным представляется использовать вакуумные управляемые разрядники РВУ [1]. Когда длительность аварийного тока превышает сотни миллисекунд возникает необходимость применения комбинации РВУ и механического замыкателя, соединённых параллельно. При такой комбинации ток через РВУ протекает только время, равное времени срабатывания механического замыкателя, т. е. десятки миллисекунд. В качестве механического замыкателя целесообразно использовать высоковольтные вакуумные контакторы с форсированием привода при включении. Сравнительно малый ход (3–6 мм) подвижных контактов в вакууме, соответствующий выдерживаемым напряжениям десятки киловольт, позволяет достигнуть времён срабатывания контакторов при включении в 5–10 мс.

Такие устройства благодаря размещению металлических контактов в герметизированном корпусе вакуумной камеры отпаянной конструкции способны работать в широком диапазоне рабочих напряжений $U = 1\text{--}30$ кВ и токов $I = 1\text{--}100$ кА. Они удобны в эксплуатации, безинерционны, пожаро- и взрывобезопасны, бесшумны, способны работать в различных средах и при любой ориентации в пространстве. Производство и эксплуатация вакуумных устройств осуществляется без загрязнения окружающей среды.

Короткозамыкатель устанавливается параллельно защищаемому оборудованию. Он должен

The high-current fast operated switching device intended for protection of the equipment from emergency currents up to 30 kA duration up to 2s is developed and tested. The device consists of the triggered vacuum switch of type RVU-43, the vacuum contactor with the electromagnetic drive connected in parallel with the switch, and the control unit. The device has to be connected in parallel to the protected object, and it provides reliable protection of the object in the case of emergency operation.

обладать способностью быстро включаться (за единицы микросекунд) и длительно (секунды) пропускать большие токи. Требуемое быстродействие на включение короткозамыкателя обеспечивает РВУ, который пропускает через себя полный ток КЗ до тех пор, пока не замкнутся контакты контактора. Кроме того, разрядник создает условия для практически бездуговой коммутации тока в вакуумном контакторе. Контактор включается через несколько миллисекунд после включения РВУ, после чего разрядник отключается, и весь ток протекает через контактор. Контактор, также как и РВУ, должен обладать большой пропускной способностью по току.

Управляемый вакуумный разрядник

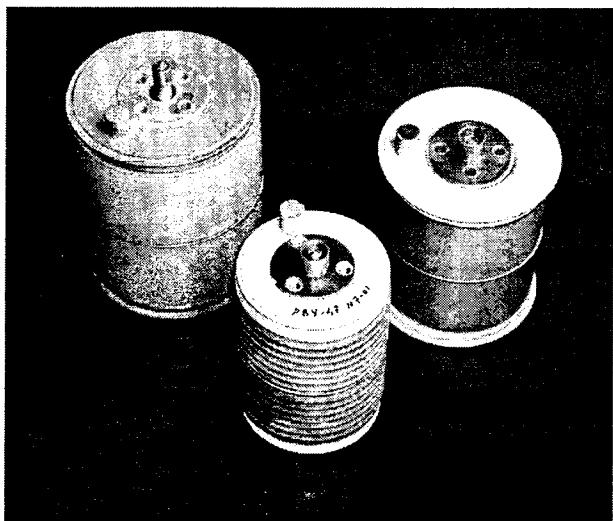
Для быстродействующего короткозамыкателя в сетях среднего напряжения требуются разрядники с большими пропускаемыми токами (до сотен килоампер), и длительность их протекания должна быть порядка времени срабатывания вакуумного контактора (5–20 мс). Необходим также большой диапазон рабочих напряжений, при которых разрядник надежно включается, – от номинального 6–110 кВ до напряжений 0,1–0,2 кВ. После включения разрядника падение напряжения на дуге не должно превышать нескольких десятков вольт, чтобы надежно отвести ток КЗ от защищаемого оборудования.

Этим требованиям в основном удовлетворяют характеристики мощных РВУ со стержневой электродной системой типа РВУ-43, РВУ-45 и РВУ-47 [2,3], способных многократно коммутировать импульсный ток с максимальной амплитудой от 200 до 500 кА. Технические характеристики мощных РВУ (рис.1) представлены в таблице.

Каждый РВУ представляет собой безнакальный трехэлектродный герметизированный прибор с давлением остаточных газов, не превыша-

РВУ-45

РВУ-43



РВУ-47

Рис.1. Сильноточные вакуумные управляемые разрядники типа РВУ-43, РВУ-47 и РВУ-45

| Характеристика | RVU-43 | RVU-45 | RVU-47 |
|--|--------|--------|--------|
| Максимальное напряжение, кВ | 30 | 25 | 25 |
| Рабочие напряжения, кВ | 0,5–30 | 0,5–25 | 0,5–25 |
| Рабочий ток, кА | 10–300 | 10–500 | 10–200 |
| Максимальное количество электричества в импульсе, Кл | 120 | 300 | 40 |
| Время восстановления электрической прочности, мкс | 100 | 100 | 100 |
| Ресурс (число включений) | 10^4 | — | 10^4 |
| Напряжение поджига, кВ | 5 | 5 | 5 |
| Ток поджига, не менее, А | 1000 | 1000 | 1000 |
| Длительность тока поджига, не менее, мкс | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| Частота, не более, Гц | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Габаритные размеры: | | | |
| – диаметр, мм | 144 | 162 | 122 |
| – высота, мм | 195 | 225 | 193 |
| – масса, кг | 7,0 | 10 | 5 |

ющим 10^{-4} Па. Включение РВУ осуществляется подачей пускового импульса напряжения на управляющий электрод. Управляющий импульс напряжения вызывает пробой по поверхности диэлектрической вставки узла поджига и генерацию инициирующего искрового разряда. Искровой разряд поддерживается катодными пятнами, которые формируются вблизи поверхности диэлектрической вставки. Они являются источником сильно ионизированной металлической плазмы, которая распространяется в ваку-

умный зазор. Когда плазма заполняет вакуумный промежуток, разряд переходит из искровой стадии в дуговую и разрядник полностью открывается.

Металлическая плазма вакуумной дуги способна пропускать большие токи между основными электродами без их существенного разрушения. При этом падение напряжения на дуге сравнительно мало (от десятков до сотни вольт). Вакуумный дуговой разряд сам себя поддерживает и погасает, когда ток в основной цепи спадает до нуля. Вследствие быстрой деионизации плазмы и конденсации металлического пара на электродах вакуумный промежуток характеризуется высокой скоростью восстановления электрической прочности.

Для всех представленных РВУ требуется напряжение поджига не менее 5 кВ. Ток поджига должен иметь форму затухающей синусоиды с амплитудой первой полуволны не менее 1 кА. Максимальный ресурс РВУ обеспечивается при определенном выборе длительности тока поджига в зависимости от формы импульса основного тока. Минимальная длительность тока поджига около 5 мкс при длительности фронта основного тока более 10 мкс.

Рабочее напряжение мощных РВУ обычно не превышает 30 кВ. Существенно повысить рабочее напряжение устройства на основе РВУ возможно путем последовательного соединения нескольких разрядников. Так, устройство, состоящее из двух последовательно соединенных РВУ-43 способно выдерживать напряжение более 80 кВ [4]. Использование трех последовательно соединенных РВУ позволяет повысить выдерживаемое напряжение до 120 кВ [5].

Вакуумный контактор

Контактор является механическим замыкателем, который обеспечивает длительное пропускание аварийных токов. Он должен выдерживать требуемое напряжение и время его включения должно быть как можно меньше (менее 20 мс).

Всем этим требованиям удовлетворяет серийный вакуумный контактор типа КВО-3-5-500, который состоит из вакуумной дугогасительной камеры (ВДК), тягового изолятора, привода и схемы управления. Использование ВДК с межконтактным зазором несколько миллиметров позволяет значительно уменьшить время включения контактора по сравнению с открытыми дугогасительными промежутками на то же напряжение. Кроме того, вакуумные контакторы обладают меньшими массогабаритными характеристиками по сравнению с другими типами

механических замыкателей.

Технические характеристики однополюсного вакуумного контактора с электромагнитным приводом типа КВО [6] на рабочее напряжение 10 кВ

| | |
|---|-----|
| Рабочее напряжение, кВ | 10 |
| Испытательное напряжение, кВ | 15 |
| Ток термической стойкости в течение 2 с, кА | 30 |
| Наибольший ток потребления | |
| электромагнита, не более, А | 9 |
| Ток удержания электромагнита, не более, А | 0,4 |
| Сопротивление силовой цепи, не более, мкОм | 70 |
| Время включения, не более, мс | 100 |
| Время отключения, не более, мс | 50 |
| Ход контакта ВДК, мм | 2–3 |

Максимальный ток, пропускаемый контактором в течение длительного времени, определяется конструкцией ВДК и привода, и может составлять до 30 кА в течение 3 с. При необходимости можно увеличить ударный ток до 50 кА путем усиления поджатия контактов в ВДК.

Максимальное рабочее напряжение вакуумного контактора определяется в основном конструкцией ВДК, и может составлять до 50 кВ. Последовательное соединение ВДК, также как и РВУ, позволит повысить рабочее напряжение до 100 кВ и более. При этом потребуется повысить электрическую прочность и у тягового изолятора.

При форсировке привода время включения контакторов можно довести до 5–20 мс.

Образец быстродействующего сильноточного короткозамыкателя

На основе изложенной выше концепции был разработан и изготовлен образец сильноточного быстродействующего короткозамыкателя, предназначенного для защиты оборудования от воздействия аварийных токов до 30 кА длительностью до 2 с при напряжении до 10 кВ (рис.2).

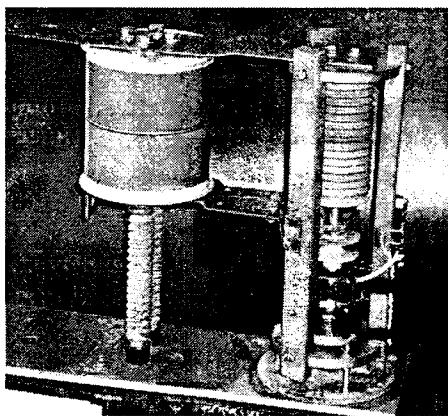


Рис.2. Сильноточный быстродействующий короткозамыкатель

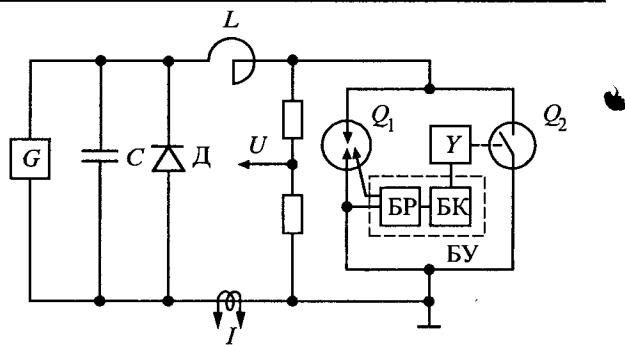


Рис.3. Схема коммутационных испытаний

Короткозамыкатель состоит из сильноточного разрядника Q_1 типа РВУ-43, параллельно подключенному к нему вакуумному контактору, содержащего вакуумную камеру Q_2 с приводом Y , и блока управления БУ включает в себя блок запуска разрядника БР и блок форсированного включения контактора БК. Полная готовность БУ к работе происходит через 1–2 мин после его подключения к сети 220 В, 50 Гц. Короткозамыкатель управляемся сигналом: $U_{\text{сигн}} = 27 \text{ В}$, $I_{\text{потр}} = 0,1 \text{ А}$, $t_{\text{сигн}} = 0,1 \text{ с}$.

В момент возникновения аварийного режима на вход БУ подается сигнал управления, который стимулирует формирование на выходе БР импульса запуска РВУ и на выходе БК импульса включения привода контактора. Общее время от момента подачи импульса на вход БУ до включения РВУ (Q_1) не превышает 10 мкс. Затем через 18–20 мс замыкаются контакты ВДК (Q_2), и контактор надежно шунтирует защищаемый объект и РВУ, после чего разрядник отключается. Отключение контактора осуществляется путем снятия постоянного сигнала управления.

Электрическая изоляция короткозамыкателя измерялась на высоковольтном стенде на максимальное переменное напряжение 100 кВ. Короткозамыкатель выдерживает испытательное напряжение 25 кВ в течение 1 мин.

Коммутационные характеристики короткозамыкателя испытывались на сильноточном импульсном стенде (рис.3), состоящем из зарядного устройства G , батареи конденсаторов емкостью $C = 12,4 \text{ мФ}$ на максимальное напряжение 3 кВ и реактора с индуктивностью $L \approx 100 \text{ мГн}$. Конденсаторная батарея шунтировалась диодным блоком D для формирования униполярного импульса тока. Во время испытаний регистрировались ток I с помощью пояса Роговского и напряжение U с помощью омического делителя. Были испытаны коммутационные характеристики каждого элемента короткозамыкателя и всего устройства в целом.

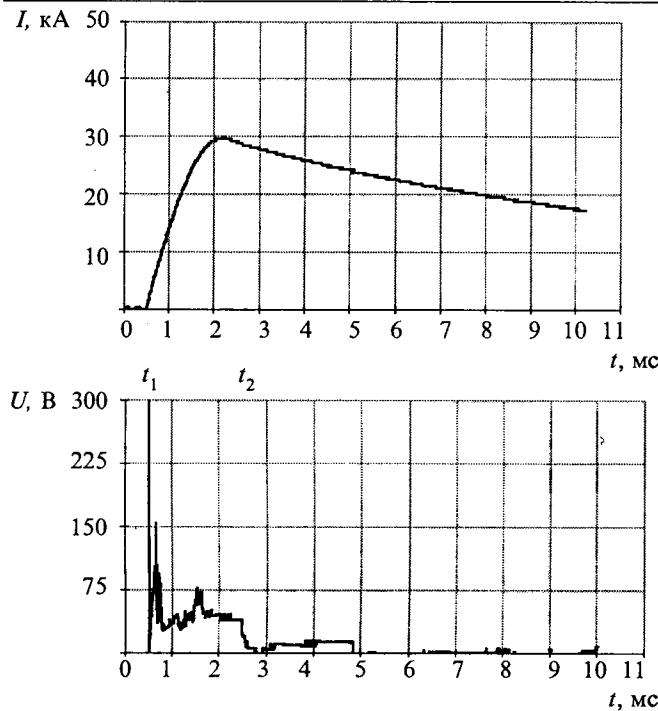


Рис.4. Осциллограммы тока I и напряжения U во время коммутации короткозамыкателя

В результате испытаний было установлено, что, как РВУ, так и контактор надежно включаются и выдерживают длительное пропускание тока с амплитудой до 30 кА. При включении контактора в начальный момент иногда наблюдался отскок контактов в течение 1–2 мс. После нескольких таких коммутаций не обнаружено разогрева фланцев разрядника и ВДК, что свидетельствует об их способности пропускать и большие токи.

Типичные осциллограммы тока и напряжения на короткозамыкателе в случае последовательного включения РВУ и контактора представлены на рис.4. Здесь блок включения контактора запускался перед включением РВУ с заданной задержкой, чтобы замыкание контактов происходило вблизи максимума тока. Разрядник включался в момент t_1 , и через него начинал протекать ток вплоть до замыкания контактов в Q_2 (момент t_2). Падение напряжения на короткозамыкателе в это время составляет 50–60 В.

После замыкания контактов напряжение на короткозамыкателе быстро спадало до нуля, а затем наблюдался кратковременный отброс контактов, когда напряжение увеличилось до 15–17 В (напряжение на вакуумной дуге в межконтактном промежутке).

Из результатов испытаний следует, что испытуемый короткозамыкатель способен быстро и надежно шунтировать защищаемый объект и длительно пропускать ток более 30 кА.

Основные технические характеристики короткозамыкателя

| | |
|--|--------|
| Испытательное напряжение, кВ | 25 |
| Рабочее напряжение, кВ | 10 |
| Ток термической и динамической стойкости, кА | < 30 |
| Время включения, мкс | < 10 |
| Время коммутации, с | < 2 |
| Число коммутаций | 10 000 |

Рабочее напряжение короткозамыкателя при желании можно повысить до 30–50 кВ, если воспользоваться более высоковольтной ВДК. Время включения короткозамыкателя также можно уменьшить до 1–2 мкс, если, например, запитать блок запуска РВУ от анодного напряжения.

Список литературы

1. Алфёров Д.Ф., Белкин Г.С., Будовский А.И. и др. Применение быстродействующих управляемых коммутирующих устройств в электроэнергетике // Электричество. 1998. № 7. С.2–8.
2. Алфёров Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Новое поколение сильноточных вакуумных управляемых разрядников // Прикладная физика. 2001. № 4. С.41–48.
3. Алфёров Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Управляемые вакуумные разрядники: основные свойства и применение // ЭЛЕКТРО. 2002. № 2. С.31–37.
4. Сидоров В.А., Алфёров Д.Ф. Электрическая прочность высоковольтного сильноточного коммутатора на основе последовательно соединенных вакуумных управляемых разрядников // Электричество. 2002. № 10. С.31–38.
5. Матвеев Н.В., Иванников И.А., Хабаров Д.А. Быстродействующая защита нагрузки от токов короткого замыкания на управляемых вакуумных разрядниках // Прикладная физика. 2001. № 4. С.49–57.
6. Алфёров Д.Ф., Будовский А.И., Иванов В.П. и др. Новое поколение вакуумных коммутационных аппаратов для железнодорожного транспорта // Труды 5-го симпозиума "Электротехника 2010". 1999. С.161.

Высоковольтное быстродействующее шунтирующее устройство

АЛФЁРОВ Д.Ф., МАТВЕЕВ Н.В., СИДОРОВ В.А., ХАБАРОВ Д.А.

Рассмотрено высоковольтное защитное шунтирующее устройство на напряжение 80–120 кВ, состоящее из нескольких последовательно соединенных управляемых вакуумных разрядников. Теоретически и экспериментально исследована вероятность пробоя такого устройства при равномерном делении напряжения между разрядниками. Предложена схема управления защитным устройством.

The high-voltage protective shunting device with rated voltage 80–120 kV, consisting of the several triggered vacuum switches connected in series is considered. The probability of breakdown of such device is investigated theoretically and experimentally at uniform voltage distribution between switches. The control circuit for such protective device is offered.

Одной из важных проблем современной высоковольтной электроэнергетики и импульсной техники является защита дорогостоящего оборудования от воздействия аварийных токов и перенапряжений. Надежным средством такой защиты является шунтирующее устройство, устанавливаемое параллельно защищаемому оборудованию. В момент аварии это устройство должно быстро переключить на себя ток источника питания и полностью отсечь накопленный в паразитных емкостях заряд. Применение такого устройства возможно также для ограничения перенапряжений на объектах с большой запасаемой энергией, например, на энергоемкой конденсаторной батарее [1]. Представляет интерес использование шунтирующего защитного устройства и в высоковольтных высокочастотных технологиях [2], если заряд, накопленный в распределенной емкости, превышает допустимый уровень (1–10 Дж).

Шунтирующее защитное устройство включает в себя быстродействующий высоковольтный переключатель с блоком управления, токоограничивающую цепочку и систему диагностики и контроля. В качестве переключателя наиболее перспективным представляется использование управляемых вакуумных разрядников (РВУ) [1–3]. РВУ обладают рядом несомненных преимуществ:

- по сравнению с тиатронами они не требуют накала и постоянно готовы к работе;
- 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.

РВУ могут работать при любой полярности напряжения благодаря способности включаться при запуске как на катоде, так и на аноде.

Поскольку максимальная электрическая прочность внутренней изоляции РВУ примерно 50 кВ, то для создания защитных устройств на напряжение 80–100 кВ и более необходимо решить проблему повышения рабочего напряжения РВУ. В данной работе рассмотрены различные способы повышения электрической прочности защитного шунтирующего устройства на основе РВУ и предложена схема его управления.

Управляемые вакуумные разрядники. РВУ представляет собой безнакальный трехэлектродный герметизированный прибор с давлением остаточного газа, не превышающим 10^{-4} Па. Включение РВУ осуществляется с помощью блока запуска, который формирует импульс напряжения на управляющем электроде и обеспечивает требуемые параметры тока поджига. Импульс напряжения вызывает пробой поджигающего промежутка, а ток поджига поддерживает горение инициирующего разряда. В результате в вакуумном промежутке между основными электродами загорается вакуумный дуговой разряд, который сам себя поддерживает и существует до окончания импульса основного тока или до его перехода через нуль.

К настоящему времени разработаны и успешно применяются несколько различных типов РВУ, перекрывающих широкий диапазон максимальных токов до 500 кА и напряжений до 50 кВ [3]. Среди них наиболее подходящим для использования в высоковольтном шунтирующем защитном устройстве является РВУ-31, который предназначен для коммутации сравнительно коротких импульсов тока (десятки микросекунд) со скоростью нарастания до 10^{11} А/с при напряжении до 50 кВ (рис.1).

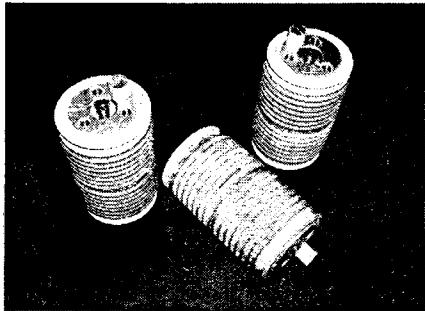


Рис.1. Вакуумные управляемые разрядники РВУ-31

Электродная система разрядника состоит из двух дисковых электродов специальной формы, разделенных зазором 5 мм. Электроды выполнены из металлокерамического материала Cr-Cu (50/50).

Характеристики РВУ-31

| | |
|--|---------|
| Максимальное напряжение, кВ | 50 |
| Рабочий ток, кА | 0,5–100 |
| Максимальное количество электричества в импульсе, Кл | 4 |
| Время восстановления электрической прочности, мкс | 30 |
| Ресурс (число включений) | 10^5 |
| Напряжение поджига, кВ | 8 |
| Ток поджига, не менее, А | 100 |
| Длительность тока поджига, не менее, мкс | 1,0 |
| Частота, не более, Гц | 10 |
| Габаритные размеры, мм: | |
| – диаметр | 102 |
| – высота | 195 |
| Масса, кг | 3,5 |

Одним из способов повышения рабочего напряжения на коммутирующем устройстве является увеличение длины его межэлектродного промежутка. Однако, как было показано в [4], один вакуумный промежуток с удвоенным зазором $2d > 15$ мм имеет меньшую электрическую прочность по сравнению с последовательно соединенными двумя вакуумными промежутками с зазором d . Этот результат обусловлен нелинейной зависимостью напряжения пробоя $U_b \sim d^a$, $a < 1$, – так называемым эффектом полного напряжения. Это эффект становится особенно заметным при увеличении зазора. При приложении импульсного напряжения (грозового импульса) преимущество последовательного соединения двух камер проявляется и при меньших значениях d .

Отметим, что увеличение межэлектродного зазора может привести также к повышению коммутационных потерь и, как следствие, снижению отключающей способности вакуумного проме-

жутка. В случае существенных коммутационных потерь в вакуумном промежутке, когда становится заметной капельная эрозия электродов, влияние эффекта полного напряжения возрастает, и зависимость U_b от d приближается к виду $U_b \sim d^{1/2}$ [5].

Поэтому наиболее предпочтительным способом повышения электрической прочности защитного устройства на основе РВУ является последовательное соединение вакуумных разрядников. Для реализации этого предложения были спроектированы и изготовлены высоковольтные коммутирующие устройства, состоящие из двух и трех последовательно соединенных разрядников типа РВУ-31 [2].

Высоковольтное коммутирующее устройство. Наиболее детально была исследована электрическая прочность коммутирующего устройства с двумя РВУ-31 (РВУ1 и РВУ2). Исследования проводились на испытательном стенде (рис.2), содержащем источник высокого постоянного напряжения $U_0 = 0 \div 140$ кВ и батарею конденсаторов C_1 и C_2 суммарной емкостью $15 \cdot 10^{-9}$ Ф. Коммутируемый ток ограничивался балластным сопротивлением $R_b = 33$ Ом. Напряжение на устройстве и ток в цепи разряда измерялись с помощью делителя напряжения ДН и датчика тока ДТ.

В процессе исследований использовалась следующая методика измерений. На испытуемое устройство медленно подавалось положительное напряжение, начиная с уровня 40 кВ, выдерживалось в течение 1 мин, затем плавно повышалось на 10 кВ с выдержкой 1 мин и т.д. до первого пробоя устройства. Перед каждым измерением напряжения первого пробоя U_b проводили-

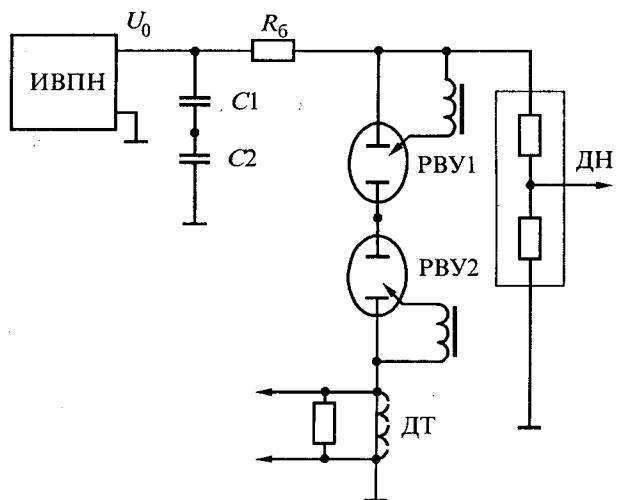


Рис.2. Схема испытательного стенда (ИВПН – источник высокого постоянного напряжения; C_1 и C_2 – батарея конденсаторов; R_b – балластное сопротивление; ДН – делитель напряжения; ДТ – датчик тока)

лось 5 коммутаций с током порядка 1,2 кА, который соответствует аварийному току. В этом режиме вакуумная дуга горит в диффузной моде, при которой эрозия электродов происходит в основном в виде металлического пара. Согласно результатам [5] в этом случае электрическая прочность РВУ должна быть максимальной.

Таким методом была измерена электрическая прочность внутренней изоляции каждого РВУ и всего устройства в целом. Прикладываемое к устройству напряжение распределялось равномерно между РВУ с помощью резистивного делителя. В каждом цикле проводилось не менее 25 измерений.

Статистическая обработка данных измерений проводилась согласно методике, описанной в [5]. Результаты такой обработки представлены на вейбулловской координатной сетке (рис.3). Здесь совокупности точек 1 и 2 представляют эмпирические функции распределения напряжений пробоя каждого РВУ ($F_1(U_1)$ и $F_2(U_2)$ соответственно), а совокупность точек 3 – эмпирическую функцию распределения напряжений пробоя устройства $F_k(U)$. Там же построены аппроксимирующие экспериментальные данные прямые 1 и 2, изображающие двухпараметрические вейбулловские функции распределения.

При анализе результатов измерений предположим, что после пробоя одного РВУ (при напряжении U_1 или U_2) ко второму прикладывается полное напряжение U . Пробой устройства происходит в результате пробоя одного из РВУ и последующего пробоя другого РВУ или в результате одновременного пробоя двух РВУ. Из этого условия можно представить вероятность пробоя устройства F_k при напряжении $U = U_1 + U_2$ в виде [6]

$$F_k(U) = F_1(U_1)F_2(U) + F_1(U)F_2(U_2) - F_1(U_1)F_2(U_2),$$

где $F_1(U)$ – вероятность пробоя первого РВУ; $F_2(U)$ – вероятность пробоя второго РВУ; U_1 и U_2 – напряжение в момент пробоя на первом и втором РВУ соответственно.

Рассчитанная таким образом вероятность $F_k(U)$ при $U_1 = U_2$ показана на рис.3 (кривая 3). Видно, что расчетная кривая удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Превышение измеренных напряжений пробоя над расчетной кривой в области малых значений вероятности пробоя может быть обусловлено возможностью уменьшения вероятности пробоя второго РВУ после пробоя первого в связи с тем, что ко второму разряднику напряжение прикладывается практически на короткое

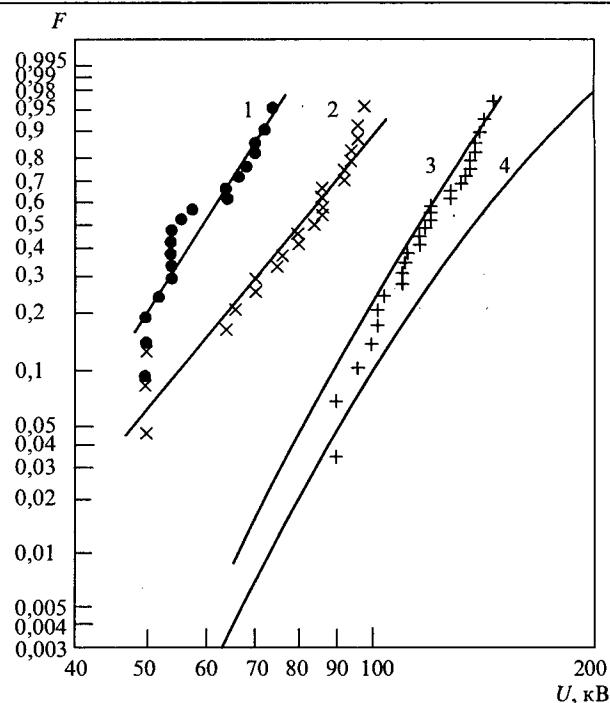


Рис.3. Функции распределения напряжения пробоя разрядников и защитного устройства

время (около 1 мкс), пока пробитый разрядник не восстановит свою электрическую прочность. Это обстоятельство не учитывалось в расчетах.

На рис.3. показаны также результаты расчета вероятности пробоя устройства (кривая 4), состоящего из двух одинаковых РВУ, вероятность пробоя которых аппроксимируется прямой 2. Видно, что подбором одинаковых РВУ с наилучшей электрической прочностью можно заметно повысить электрическую прочность всего устройства.

Заделное устройство и схема управления. В состав заделного устройства, помимо нескольких последовательно соединенных РВУ, входит активно-емкостной делитель напряжения. С его помощью обеспечивается равномерное распределение напряжения на разрядниках в статическом и динамическом режимах.

Как было отмечено, вакуумные разрядники могут работать как при положительном, так и при отрицательном напряжении на основном промежутке. Разница заключается в токе запуска. Он должен быть намного больше, когда вакуумный разрядник запускается на аноде. С другой стороны, катодный запуск становится затруднительным, когда положительный вывод нагрузки заземлен.

Электрическая схема, представленная на рис.4, показывает возможные способы последовательного соединения вакуумных разрядников.

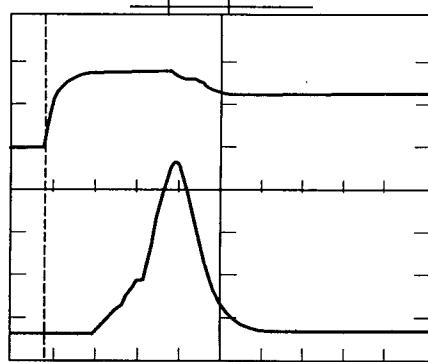
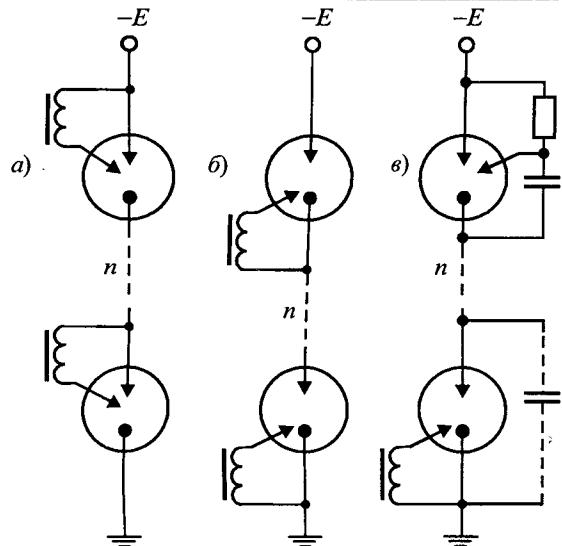


Рис.5. Испытание УЗ-120 при напряжении 120 кВ (вверху – ток поджига; внизу – коммутируемый ток, 1 кА/дел)

Частью импульса основного тока объясняется задержкой распространения сигнала в блоке запуска.

На основе этих результатов были разработаны устройства защиты, имеющие два и три последовательно соединенных РВУ [2]. Они содержат основной вакуумный модуль, токоограничивающую цепь, блок запуска и датчик тока на основе эффекта Холла, установленный в цепи нагрузки. Эти устройства предназначены для защиты гиротрона в высоковольтном быстродействующем источнике питания. Основные параметры и размеры устройства защиты приведены в таблице.

Представленное устройство отличается высокой гибкостью с точки зрения увеличения количества последовательно соединенных приборов и возможностью простого изменения полярности приложенного напряжения.

Таким образом, быстродействующее шунтирующее устройство, выполненное на основе вакуумных управляемых разрядников, дает очень простое, надежное и недорогое решение для дополнительной защиты уникальных высоковольтных нагрузок от повреждений.

Необходимо заметить, что увеличение количества соединенных последовательно разрядников практически не влияет на полное время задержки. Как показано на рис.5 для случая трех последовательно соединенных приборов, есть только две ступени в нарастании тока, которые соответствуют коммутации первого РВУ, а затем коммутации второго РВУ. Временной сдвиг между импульсом внешней синхронизации и на-

стартом импульса основного тока объясняется задержкой распространения сигнала в блоке запуска.

На основе этих результатов были разработаны устройства защиты, имеющие два и три последовательно соединенных РВУ [2]. Они содержат основной вакуумный модуль, токоограничивающую цепь, блок запуска и датчик тока на основе эффекта Холла, установленный в цепи нагрузки. Эти устройства предназначены для защиты гиротрона в высоковольтном быстродействующем источнике питания. Основные параметры и размеры устройства защиты приведены в таблице.

| Характеристика | УЗ-80 | УЗ-120 |
|-------------------------------|---------|----------|
| Рабочее напряжение, кВ | 10–80 | 10–120 |
| Выдерживаемое напряжение, кВ | 90 | 130 |
| Коммутируемый ток, кА | 0,1–10 | 0,1–10 |
| Заряд за импульс, Кл | 1 | 1 |
| Время задержки включения, мкс | 2–5 | 2–5 |
| Время включения, мкс | 0,8 | 0,8 |
| Диаметр/длина, мм | 210/800 | 250/1000 |
| Масса, кг | 12 | 15 |

Предложенная схема управления РВУ позволяет значительно увеличить предельно допустимое напряжение устройства без существенного усложнения цепи запуска. Увеличение числа последовательно соединенных приборов не приводит к пропорциональному увеличению времени включения устройства.

Список литературы

1. Алфёров Д.Ф., Белкин Г.С., Будовский А.И. и др. Применение быстродействующих управляемых коммутирующих устройств в электроэнергетике // Электричество. 1998. №7. С.2–8.
2. Матвеев Н.В., Иванников И.А., Хабаров Д.А. Быстродействующая защита нагрузки от токов короткого замыкания на управляемых вакуумных разрядниках // Прикладная физика. 2001. №4. С.49–57.
3. Алфёров Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А. Управляемые вакуумные разрядники: основные свойства и применение // ЭЛЕКТРО. 2002. №2. С.31–37.

4. Giere S., Karner H.C., Knobloch H. Dielectric Strength of Double and Single-Break Vacuum Interrupters // IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. 2001. Vol. 8, №1. P.43–47.

5. Сидоров В.А., Алфёров Д.Ф. Электрическая прочность сильноточных вакуумных управляемых разрядников // ПТЭ. 2001. №1. С.92–100.

6. Сидоров В.А., Алфёров Д.Ф. Электрическая прочность высоковольтного сильноточного коммутатора на основе последовательно соединенных вакуумных управляемых разрядников // Электричество. 2002. №10. С.31–38.

Матвеев Николай Викторович – канд. техн. наук в филиале ГУП ВЭИ (г. Истра) – ВНИЦ ВЭИ им. В.И. Ленина. Окончил МЭИ, факультет электронной техники в 1977 г. Защитил диссертацию "Исследование динамических характеристик электронно-лучевых вентилей и разработка быстродействующих коммутаторов повышенной частоты" в 1987 г.

Хабаров Дмитрий Алексеевич – инженер филиала ГУП ВЭИ (г. Истра) – ВНИЦ ВЭИ им. В.И. Ленина. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1984 г.



Журнал "Электротехника" переводится на английский язык и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" в полном объеме. Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар авторам статей, опубликованных в журнале.
Справки по тел.: 203-35-33.



**Вниманию руководителей предприятий, объединений,
НИИ и КБ, вузов**

Редакция журнала "Электротехника" предлагает услуги по подготовке и выпуску на договорных условиях специальных (тематических) номеров журнала "Электротехника" по тематике и материалам (в том числе и рекламным) заказчика.

Справки по телефону: **361-95-96**

ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ САБИНИН

25 ноября 2003 г. исполняется 90 лет заслуженному деятелю науки и техники РФ, профессору кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем (Э и ПЭМС) С.-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) Юрию Алексеевичу Сабинину.

Ю.А.Сабинин по праву считается одним из основоположников ленинградской школы электромехаников. Еще в начале 60-х годов в соавторстве с В.П.Андреевым он подготовил и опубликовал книгу "Основы электропривода", явившуюся долгие годы основным учебным пособием по теории электропривода как у нас в стране, так и за рубежом. Книга переведена в Польше, Венгрии, Китае и Болгарии.

Свою производственную деятельность Ю.А.Сабинин начал с работы электромонтером, которую совмещал с учебой в техникуме, затем учился на вечернем отделении Ленинградского политехнического института, после окончания которого в 1939 г. был оставлен в аспирантуре. Учебу в ней прервала Великая Отечественная война. В годы войны Ю.А.Сабинин работал начальником лаборатории автоматики в Ленэнерго.

В 1946 г. Юрий Алексеевич возвратился в Политехнический институт, где прошел путь от ассистента до заведующего кафедрой. Все эти годы профессор Ю.А.Сабинин совмещал преподавательскую деятельность в ЛПИ с руководством лабораторией, потом отделом в Институте электромеханики. Руководил работами по проектированию уникальных прецизионных электроприво-



дов для астрофизических объектов, в том числе и для самого крупного в мире телескопа с шестиметровым зеркалом, за что был награжден орденом "Знак Почета" и Золотой медалью ВДНХ.

В 1967 г. профессор Ю.А.Сабинин был избран на должность заведующего кафедрой "Автоматики и телемеханики" Ленинградского института точной механики и оптики, которую он возглавлял более 20 лет.

В 1992 г. Ученый совет института в связи с возрастающим использованием в оптическом приборостроении прецизионных электромеханических систем с питанием от высокоэффективных полупроводниковых усилительно-преобразовательных устройств с компьютерным управлением и эффективностью работ научно-педагогической школы профессора Т.А. Глазенко в этом направлении принял решение ходатайствовать перед Государственным комитетом РФ по высшему образованию об открытии в институте нового направления подготовки специалистов.

В 1993 г. приказом № 196 Государственный комитет РФ по высшему образованию дополнил

перечень направлений базового высшего образования технического университета (СПбГИТМО) направлением 551300 – "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" с дальнейшим продолжением выпуска инженеров по специальности 1801 "Электромеханика" на кафедре Э и ПЭМС.

В связи с тем, что эта кафедра стала совмещать преподавание традиционных для нее дисциплин электронно-электротехническими циклами для основных базовых направлений университета: оптотехника и приборостроение, и специальных дисциплин для своей выпускающей группы, Юрий Алексеевич в 1995 г. перешел на кафедру Э и ПЭМС для постановки и преподавания специальных курсов: "Электрические машины", "Основы электропривода" и "Прецизионные следящие системы оптических комплексов".

Ю.А.Сабинин воспитал многочисленные кадры высококвалифицированных инженеров, научных работников. Им подготовлено 44 кандидата и 3 доктора технических наук. Огромная общественно-научная работа является отличительной чертой Юрия Алексеевича. Он непременный организатор и активный участник всех крупных научных мероприятий в области автоматики промышленных установок, является действительным членом Международной энергетической академии, автором 15 книг и учебников, имеет более 200 научных трудов и изобретений.

Сердечно поздравляя юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, долгих лет жизни и новых творческих успехов на благо российской науки.

С 14 по 17 сентября 2004 г. в г. Магнитогорске состоится IV Международная (XV Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу "Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития". Основные направления работы конференции: теоретические вопросы электропривода; новые технические средства и электроприводы на их основе; современные способы управления в электроприводе; актуальные вопросы электропривода в различных отраслях народного хозяйства; энерго- и ресурсосбережение средствами электропривода; подготовка инженерных и научных кадров по электроприводу.

Для участия в конференции необходимо до 01.04.2004 г.:

- выслать в адрес оргкомитета доклад, заявку на участие и договор;
- произвести предоплату за участие в конференции.

Оргвзнос за участие в конференции составляет 200 евро + НДС для предприятий, 60 евро + НДС для НИИ и ВУЗов, 800 евро + НДС для иностранных фирм. На основании заявки и предоплаты участнику высыпается пригласительный билет с программой. К началу конференции будут изданы труды конференции.

Заявки направлять по адресу: 455002, г. Магнитогорск, ул. Кирова, 93, ОАО "ММК", начальнику ОНТИ Ганозину А.В., доклады – по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, зав. кафедрой электротехники и электротехнических систем Карапандаеву А.С.

Конференция будет проходить на базе ОАО "ММК" в санатории "Юбилейный" на озере "Банное". Расселение участников в санатории платное в двухместных люксовых и полулюксовых номерах ориентировочной стоимостью 500-900 руб. в сутки за одного человека.