

Нагрузочные характеристики бакового выключателя с вакуумной дугогасительной камерой и элегазовой изоляцией на номинальное напряжение 110 кВ¹

ИВАНОВ А.Н., МОРОЗОВ С.А., ПАРФЕНОВ Д.Е., ЧЕМЕРИС В.С., БЕЛКИН Г.С.

Проведен анализ тенденций развития вакуумной коммутационной аппаратуры в современной электроэнергетике. Представлена конструкция бакового элегазового выключателя с вакуумной дугогасительной камерой на номинальное напряжение 110 кВ как образец перспективного высоковольтного оборудования. Проведено исследование нагрузочных характеристик в нормальных условиях и подтверждена нагрузочная способность аппарата при номинальных токах 2500 и 3150 А для условий низких температур окружающей среды и при аварийном сбросе давления.

Ключевые слова: баковый элегазовый выключатель, вакуумная дугогасительная камера, нагрузочная способность, ток, давление, элегаз

В настоящее время в мире интенсивно проводятся работы по созданию вакуумных выключателей высокого напряжения (72,5 кВ и выше). Это связано с рядом преимуществ вакуумных выключателей перед элегазовыми. Они идеальны с экологической точки зрения, обладают высоким ресурсом, способны работать при очень низких температурах.

На мировом рынке появились вакуумные выключатели на напряжение до 170 кВ в колонковом и баковом исполнении. Сдерживает широкое применение вакуумных выключателей высокого напряжения более высокая цена по сравнению с элегазовыми выключателями.

В РФ двухразрывный вакуумный выключатель ВБП-110 на номинальное напряжение 110 кВ производит ОАО «НПП «Контакт». В этом выключателе используются вакуумные дугогасительные камеры (ВДК) разработки ФГУП ВЭИ [1]. Концерн «Высоковольтный союз» разработал одноразрывный вакуумный выключатель ВРС-110 на напряжение 110 кВ с использованием импортных камер (производства КНР).

В мире и РФ проводятся работы по повышению параметров ВДК для улучшения технико-экономических показателей выключателей. Наибольших успехов в создании вакуумных выключателей на напряжения свыше 72,5 кВ добилась фирма

The trends existing in the development of vacuum switching apparatuses for the modern electric power engineering are analyzed. The design of a tank-type SF₆ circuit breaker equipped with a vacuum arc chute for a 110 kV voltage rating is presented as a prospective model of high-voltage equipment. The apparatus loading characteristics are investigated under normal conditions of its operation, and its load capacity at rated currents equal to 2500 and 3150 A under the conditions of low ambient temperatures and emergency drop of pressure is confirmed.

Key words: tank-type SF₆ circuit breaker, vacuum arc chute, load capacity, current, pressure, sulfur hexafluoride

Japan AE Power Systems Corporation (JAEPSC), которой созданы и производятся двухразрывные колонковые выключатели на напряжение 170 кВ, одноразрывные колонковые на 145 кВ, а также баковые выключатели с воздушной изоляцией на напряжения 72,5–120 кВ с одним разрывом в полюсе и на напряжение 170 кВ с двумя разрывами в полюсе [2]. Разработано фирмой JAEPSC и КРУ с вакуумным выключателем и воздушной изоляцией на напряжение 72,5 кВ [3]. Разработки одноразрывных вакуумных выключателей на напряжение 126 кВ проводятся в КНР, фирма Сименс работает над камерой на напряжение 145 кВ.

В ФГУП ВЭИ проводятся работы по созданию ВДК на номинальное напряжение 110 кВ для одноразрывных выключателей колонкового и бакового исполнения [4]. Одним из применений таких ВДК является разрабатываемое в ФГУП ВЭИ комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ) с вакуумным выключателем на напряжение 110 кВ с номинальным током 3150 А и номинальным током отключения 40 кА.

При проектировании КРУЭ выбрана пофазная компоновка, когда каждая фаза имеет свой индивидуальный корпус. Это повышает надежность работы трехфазного устройства, так как фазы изолированы друг от друга. Пофазная компоновка позволяет применить более простые и дешевые в изготовлении однофазные барьерные изоляторы, значительно упрощается компоновка. В выключателе

¹ Исследования выполнены по контракту с Минобрнауки – Государственный контракт № 16.526.12.6009 – и по договору с ОАО «ФСК ЕЭС» № Д-01200-10.11-1П-1К-73.

использована одна из модификаций ВДК, разработанных в ФГУП ВЭИ.

На рис. 1 представлена конструкция опытного образца полюса выключателя. Вакуумная камера 1 жестко закреплена в корпусе 2 со стороны неподвижного контакта на верхнем опорном изоляторе 3. Нижний токосъем 4, соединенный с подвижным контактом ВДК, установлен на нижнем опорном изоляторе 5. На камере установлены электростатические экраны 6, форма которых оптимизирована для выполнения требований по электрической прочности газовой изоляции на класс напряжений 110 кВ.

Подвижный контакт камеры управляется изоляционной тягой, которая через трансмиссионный механизм связана с выходным валом выключателя. В конструкции трансмиссионного механизма предусмотрен узел поджатия, обеспечивающий заданное усилие сжатия контактов вакуумной камеры. Сила поджатия выбрана из условия длительного протекания тока 3150 А.

Кинематика трансмиссионного механизма и конструкция изоляционной тяги оптимизированы таким образом, что позволяют свести к минимуму боковые нагрузки, действующие на нижний фланец вакуумной камеры. Тем самым повышается надежность работы вакуумной камеры в аппарате.

Все токоведущие элементы выключателя изготовлены из меди, что обусловлено высоким значением номинального тока. Контактные площадки

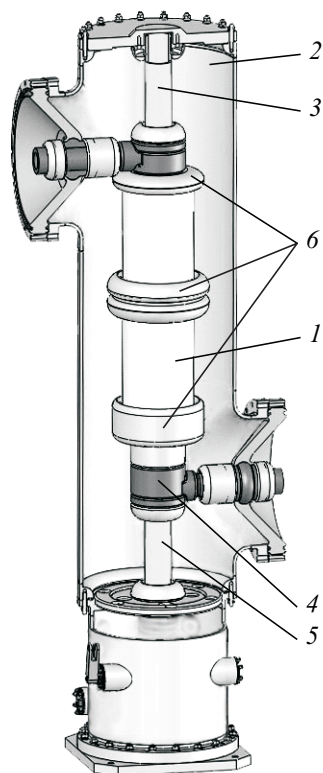


Рис. 1. Конструкция полюса выключателя

медных деталей имеют серебряное покрытие для снижения переходного сопротивления. Корпус аппарата выполнен из алюминиевого сплава. Толщина стенки корпуса выбрана из условия стойкости на прожог от горения дуги в течение 0,3 с.

При проектировании опытного образца полюса выключателя изоляционной средой был выбран элегаз с минимальным рабочим давлением 0,22 МПа. Изоляция выключателя при этом давлении удовлетворяет нормированным воздействиям, соответствующим изоляционному уровню аппаратов класса напряжения 110 кВ. Выбор довольно низкого значения рабочего давления элегаза объясняется возможностью применять выключатель при температуре окружающей среды до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ без использования подогрева.

Для управления выключателем предусмотрен пружинный привод СНТ-8 с энергией 500 Дж. Привод связан с выходным валом каждого из полюсов выключателя и управляет тремя фазами аппарата одновременно.

Одно из направлений исследования разработанного образца выключателя – определение условий нагрева токоведущих частей и оболочки аппарата при длительном протекании нагрузочных токов. Нагрев элементов вакуумного выключателя КРУЭ при номинальном токе 3150 А является серьезной проблемой, так как внутри ВДК вакуумного выключателя используются только торцевые контакты. Это потребовало проведения исследований состояния выключателя при пропускании больших номинальных токов.

Методом эквивалентных тепловых источников был проведен расчет нагрева ВДК-110 номинальным током в свободной атмосфере [5]. Было определено, что при сопротивлении камеры 21 мкОм и менее температура вывода подвижного контакта не превышает допустимую при номинальном токе 3150 А без установки радиаторов. Предполагалось, что в КРУЭ при токе 3150 А температура наиболее нагретой точки также не будет превосходить допустимую при сопротивлении ВДК 20–25 мкОм. В установленном режиме радиальный тепловой поток в КРУЭ будет намного превышать радиальный теплоотвод от ВДК в свободной атмосфере, что облегчает тепловой режим токоведущей системы в КРУЭ.

По указанным причинам при создании ВДК для КРУЭ была поставлена задача – достигнуть значений сопротивления камеры 20–25 мкОм. Такие камеры использовались при исследовании нагрева номинальным током.

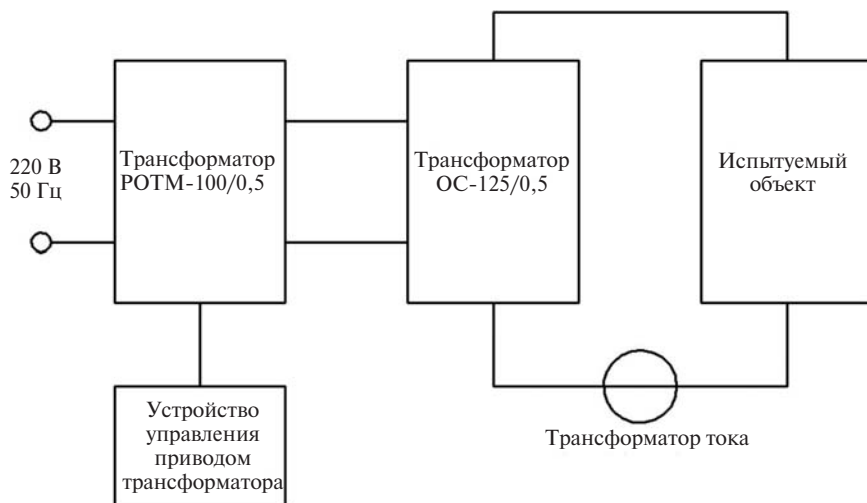


Рис. 2. Структурная схема испытательного стенда

Исследования полюса выключателя на нагрев при продолжительном режиме работы проводились по методике ГОСТ 8024–90.

Структурная схема испытательного стенда приведена на рис. 2.

Технические характеристики стенда:

максимальный выходной ток 10,246 кА;

номинальная частота 50 Гц;

мощность 125 кВА;

напряжение питания 220 В;

плавная дистанционная регулировка выходного тока от 0,5 до 10 кА.

В состав стенда входят: выходной силовой трансформатор типа ОС-125/0,5-УХЛ4М; регулировочный трансформатор типа РОТМ-100/0,5 УХЛ4; устройство управления механизмом передвижения обмоток регулировочного трансформатора РОТМ-100/0,5 УХЛ; устройство контроля выходного тока силового трансформатора ОС-125/0,5-УХЛ4М; кабели типа ВВГнг.

Для измерения значения тока нагрузки в полюсе выключателя использовался трансформатор тока типа ТНШЛ-0,66 с классом точности 0,2S, вторичная обмотка которого включалась на амперметр типа Ц33 с классом точности 2,5 и пределами измерений до 10 А.

Установка исследовавшегося полюса выключателя на стенде тепловых испытаний представлена на рис. 3

Для исключения влияния подводящих шин на нагрев непосредственно выключателя были использованы буферные объёмы: угловые модули на обоих выводах полюса выключателя. Подключение к ним нагрузочного трансформатора осуществлялось восемью кабелями (каждый сечением 150 мм²), соединёнными параллельно.

Для измерения температуры нагрева частей испытуемого объекта использовались термопары «хромель–капель». Использовался метод сравнения показаний термопар с эталонным измерителем абсолютной температуры. В качестве такого измерителя использовался датчик температурный проходной из комплекта прибора «Измеритель температуры восьмиканальный компьютерный» типа АРС-0105 фирмы АКТАКОМ. Измерения температуры окружающего воздуха проводились по п. 2.2.1 ГОСТ 8024–90.

Число термопар и места их установки выбирались из условия более полного исследования нагрева непосредственно токопроводящей цепи выключателя, нагрева изоляционной среды и наружной поверхности самого бака.

Перед проведением и после окончания испытаний выполнялись измерения сопротивления токоведущей цепи испытуемого объекта. При этом активное сопротивление ВДК в исследовавшемся полюсе выключателя до и после испытаний находилось в пределах 24–24,5 мкОм. При испытаниях полюс выключателя заполнялся элегазом до давления, предусмотренного программой испытаний, 0,22 и 0,4 МПа. Угловые модули заполнялись смесью газов: элегаз (SF₆) и азот (N₂) в соотношении 20 и 80% соответственно при давлении газовой смеси 0,6 МПа. Использование газовой смеси в смежных с полюсом выключателя угловых модулях обусловлено возможностью применения КРУЭ при низких температурах окружающей среды.



Рис. 3. Выключатель на этапе подготовки к тепловым испытаниям

Исследования нагрузочных характеристик полюса выключателя проводились в режимах:

при токе 2500 А и давлении в полюсе выключателя элегаза 0,22 МПа – в угловых модулях газовой смеси 0,6 МПа;

при токе 3150 А и давлении в полюсе выключателя элегаза 0,4 МПа – в угловых модулях газовой смеси 0,6 МПа.

На рис. 4 представлены результаты тепловых испытаний выключателя: две линии распределения температур перегрева на токоведущих частях аппарата. Левая линия (тонкая) соответствует данным, полученным при протекании номинального тока 2500 А в течение 8 ч и абсолютном давлении элегаза 0,22 МПа. Оболочка аппарата при этом прогрелась до максимальной температуры 33 °С. Правая линия (утолщенная) соответствует данным, полученным при протекании номинального тока 3150 А в течение 8 ч и абсолютном давлении элегаза 0,4 МПа. Максимальная температура нагрева оболочки при этом составила 35,8 °С.

Тонированные области в начале и в конце графика соответствуют температуре в ламельных контактных соединениях выключателя. Температура перегрева на вводах в угловые модули составляла при токе 2500 А 45 и 46 К, при токе 3150 А – 65 и 66 К.

Полученные значения температуры перегрева на токоведущих частях полюса выключателя удовлетворяют требованиям ГОСТ 8024–90 к контактам и контактным соединениям элегазовых аппаратов.

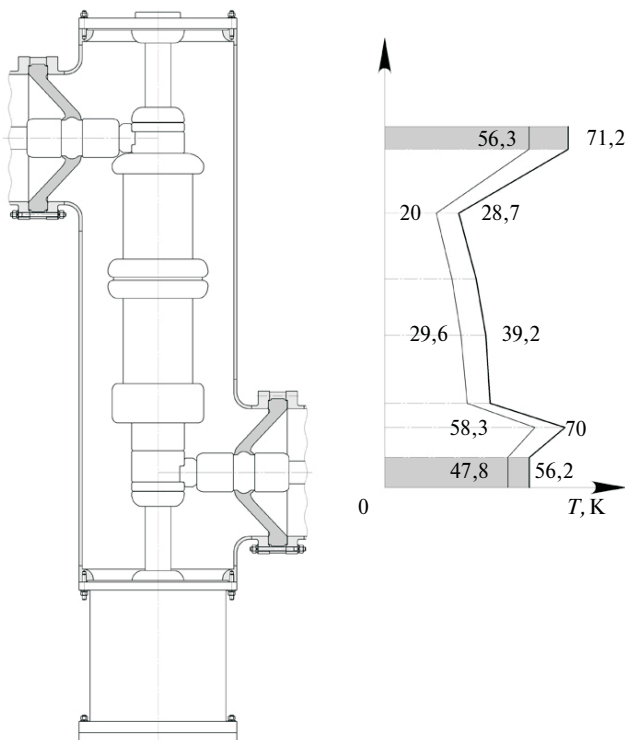


Рис. 4. Результаты тепловых испытаний выключателя

Определяющими температурами перегрева, полученными при испытаниях, являются их значения на скользящем контакте полюса выключателя: 58,3 К при токе 2500 А и 70 К при токе 3150 А. Температура перегрева 70 К при токе 3150 А на скользящем контакте также допустима при использовании на ламелях контакта накладок из серебра.

Таким образом, подтверждена возможность применения бакового элегазового выключателя с ВДК на номинальное напряжение 110 кВ при температуре окружающего воздуха –45 °С (давление элегаза 0,4 МПа, 20 °С) и длительном токе нагрузки 3150 А и температуре окружающего воздуха –60 °С (давление элегаза 0,22 МПа, 20 °С).

Дополнительно были исследованы нагрузочные характеристики выключателя в условиях потери в нём избыточного давления элегаза при токах 2500 и 3150 А. На рис. 5 представлена зависимость температуры перегревов на скользящем контакте, наиболее нагруженном элементе токоведущей цепи выключателя, от времени нагрева.

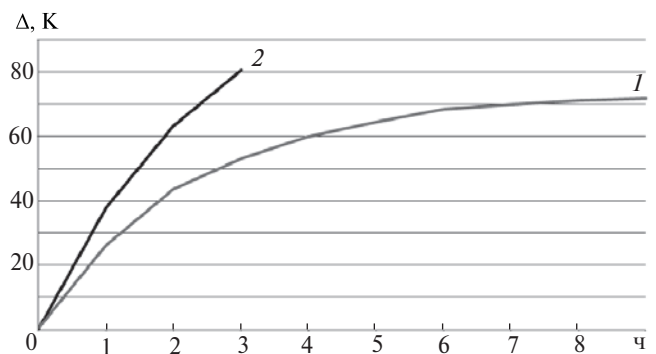


Рис. 5. Зависимость температуры перегрева скользящего контакта выключателя от времени: 1 – 2500 А; 2 – 3150 А ($P_{SF6} = 0$ ати; допустимый перегрев 75 К)

Установлено, что при отсутствии избыточного давления элегаза в выключателе аппарат может длительно работать с токовой нагрузкой 2500 А без превышения предельной температуры перегрева и рабочем напряжении.

В тех же условиях выключатель при токовой нагрузке 3150 А способен с момента включения проработать без превышения предельной температуры перегрева и рабочем напряжении в пределах 2,5 ч.

Закключение. При испытаниях подтверждена нагрузочная способность бакового элегазового выключателя с ВДК на номинальное напряжение 110 кВ при низких температурах без использования внешнего подогрева и отсутствия конденсации элегаза в условиях длительного протекания номинальных токов 3150 А при температуре окружающего воздуха –45 °С и 2500 А при температуре окружающего воздуха –60 °С.

Выключатель может длительно осуществлять питание нагрузок с током потребления 2500 А при потере в выключателе избыточного давления элегаза и кратковременно при тех же условиях в течение 2,5 с с момента включения нагрузки поддерживать питание нагрузки с током потребления 3150 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г. Применение различных сред для дугогашения и изоляции в электрических коммутационных аппаратах напряжением 6–220 кВ. – Энергоэксперт, 2010, № 3 (20), с.28–32.
2. Matsui Y., Nagatake K., Takeshita M. et al. Development and Technology of High Voltage VCBs. Brief History and State of Art, XXII Int.Symp.on Disch. and El.Ins. in Vacuum, 2006.
3. Sakaki M., Koga H., Eukuda Y., Kitamura H. Development of 72 kV Cubicle-Type Dry-Air Insulated Switchgear. – Japan AE Power Systems Review, 2010, vol. 3, August.
4. Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г. Создание вакуумной коммутационной аппаратуры на напряжение 72,5–220 кВ; состояние и перспективы. – Электричество, 2011, № 9, с.28–31.
5. Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г. Метод эквивалентных тепловых источников для расчета нагрева токоведущих систем электрических аппаратов. – Электричество, 2010, № 10, с.2–10.

[04.06.13]

Авторы: Иванов Александр Николаевич окончил энергетический факультет МГАУ им. В.П. Горячкина в 2007 г. Ведущий инженер ФГУП ВЭИ.

Морозов Станислав Андреевич окончил Рязанский радиотехнический институт в 1961 г. Инженер первой категории ФГУП ВЭИ.

Парфенов Дмитрий Евгеньевич окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Ведущий инженер-конструктор ФГУП ВЭИ.

Чемерис Владлен Семенович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1953 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию «Коммутационная износостойкость элементов дугогасительных устройств автокомпенсированных элегазовых выключателей» в ВЭИ. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Белкин Герман Сергеевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1962 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электрические аппараты» в ВЭИ. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.