

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

С.Е.Соколов, И.С. Соколова.

**ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ**

Учебное пособие

Алматы  
АУЭС  
2016

УДК 621.316.5 (075.8)  
ББК 31.264Я73  
С 594

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и автоматизации технологических процессов Каз НИТУ

**Бекбаев А.Б.**

Доктор технических наук, профессор,  
кафедры электротехники, электроники и телекоммуникаций Каз НИТУ

**Исембергенов Н.**

Доктор технических наук, профессор  
кафедры ЭАПУ АУЭС

**Сагитов П.И.**

Рекомендовано к изданию Ученым Советом Алматинского университета энергетики и связи (Протокол № 1 от 23.09.2016). Печатается по дополнительному плану выпуска ведомственной литературы АУЭС на 2015 год, позиция \_\_.

**Соколов С.Е., Соколова И.С.**

С 594 Вакуумные выключатели. Учебное пособие.: в 24. С.Е.Соколов, И.С.Соколова. - Алматы: АУЭС, 2016. – 70 с.: табл. 17, илл.40, библи.- 22.

**ISBN 978-601-7889-06-7**

В представленном учебном пособии содержатся сведения по физике разряда в вакууме и особенностям конструкции современных вакуумных выключателях и их эксплуатации.

Учебное пособие предназначено для студентов и магистрантов по специальности 5В071800 и 6М971800 Электроэнергетика

УДК 621.316.5 (075.8)  
ББК 31.264Я73

ISBN 978-601-7889-06-7

©АУЭС, 2016  
Соколов С.Е.,  
Соколова И.С., 2016

Соколов Сергей Евгеньевич  
Соколова Ирина Сергеевна

# ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Учебное пособие

Редактор

Н.М.Голева

Подписано в печать \_\_\_\_ \_\_\_\_.2016 г.  
Тираж 50 экз. Формат 60x84 1/16

Бумага типографская №2  
Уч.-изд.л. 4,375 Заказ №\_\_\_\_  
Цена 2190 тенге.

Некоммерческое АО «АУЭС»  
г.Алматы, ул.Байтурсынова, 126

Копировально-множительное бюро  
некоммерческого акционерного общества  
«Алматинский университет энергетики и связи»  
г.Алматы, ул.Байтурсынова, 126

Некоммерческое акционерное общество  
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ  
Кафедра Электрических станций, сетей и систем

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебно-методической  
работе

\_\_\_\_\_ С.В. Коньшин  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

# ВЫСОКОВОЛТНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

## Учебное пособие ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Часть 2

Для студентов и магистрантов  
специальности 6В071800 и 6М071800 - Электроэнергетика

СОГЛАСОВАНО; Рассмотрено и одобрено

Начальник УМО

на заседании кафедры

ЭССиС \_\_\_\_\_ М.А. Мустафин

Протокол № от «16» 03 2015г.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Зав. кафедрой ЭССиС, к.т.н.,

Председатель ОУМК по МО и Э

доцент

\_\_\_\_\_ Б.К. Курпенов

\_\_\_\_\_ Е.К. Умбеткулов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г

Редактор \_\_\_\_\_ Н.М. Голева

СОГЛАСОВАНО;

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Зав. кафедрой ЭПП, доцент

Специалист по стандартизации

\_\_\_\_\_ Башкиров М.В

\_\_\_\_\_

Зав. кафедрой ЭиАПУ, профессор

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г

\_\_\_\_\_ Сагитов П.И

СОСТАВИТЕЛИ:

профессор кафедры ЭССиС, д.т.н

Ст преподаватель кафедры ЭССиС

\_\_\_\_\_ С.Е. Соколов

\_\_\_\_\_ И.С. Соколова

Алматы 2016 г.

## Введение

Основными коммутационными аппаратами, служащими для включения и отключения электрических цепей высокого напряжения в нормальных и аварийных режимах являются выключатели, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- надёжное отключение нормальных и аварийных токов;
- быстрдействие, т.е. наименьшее время отключения;
- пригодность для автоматического повторного включения;
- удобство ревизии и обслуживания;
- взрыво- и пожаробезопасность.

До недавнего времени в распределительных устройствах высокого и сверхвысокого напряжения использовались масляные и воздушные выключатели. При этом на напряжении до 110 кВ использовались малообъемные выключатели (горшковые) типа ВМГ-133, ВМГ-10, ВМП -10, С-35 и их модификации, на напряжении 110 кВ - 220 кВ - многообъемные (баковые) выключатели типа У-110, У-220 и на напряжениях выше 220 кВ - воздушные выключатели различных типов.

При больших токах отключения предусматривается две пары контактов: рабочие - снаружи выключателя, дугогасительные - внутри металлического бачка, а каждый полюс имеет два разрыва. По такой схеме выполнялись выключатели серий МГГ и МГ на напряжение до 20 кВ включительно.

Недостатки маломасляных выключателей: взрыво - и пожароопасность; невозможность осуществления быстрдействующего АПВ; необходимость периодического контроля; относительно частая замена масла в дугогасительных бачках; трудность установки встроенных трансформаторов тока; относительно малая отключающая способность.

Основные недостатки многообъемных баковых выключателей: взрыво - и пожароопасность; необходимость периодического контроля за состоянием и уровнем масла в баке и вводах; большой объем масла, что обуславливает большую затрату времени на его замену; необходимость больших запасов масла; непригодность для установки внутри помещений.

В воздушных выключателях гашение дуги происходит сжатым воздухом при давлении 2 МПа - 4 МПа, а изоляция токоведущих частей и дугогасительного устройства осуществляется фарфором или другими твердыми изолирующими материалами. Конструктивные схемы воздушных выключателей различны и зависят от их номинального напряжения, способа создания изоляционного промежутка между контактами в отключенном положении, способа подачи сжатого воздуха в дугогасительное устройство.

Различными заводами - изготовителями были освоены выключатели серий ВВ, ВВБ, ВВБК, ВНВ, ВВГ, которые использовались на высоком и сверхвысоком напряжении вплоть до 1150 кВ.

Основы теории горения и гашения дуги, а также конструктивные особенности масляных и воздушных выключателей хорошо известны и

описаны во многих учебниках, научных работах и в каталогах заводов изготовителей.

Выполнив свою задачу по обеспечению эксплуатации электрических станций сетей и систем, масляные и воздушные выключатели уже давно сняты с производства. На смену им пришли более совершенные и надежные вакуумные и элегазовые выключатели и комплектные РУ с элегазовой изоляцией.

К сожалению, в настоящее время в учебной литературе отсутствуют учебники и учебные пособия, в которых были бы систематизированы основы теории, работы, особенности конструкции, состояние и перспективы развития современных вакуумных и элегазовых выключателей и комплектных распределительных устройств (ячеек) на их основе.

В настоящей работе сделана попытка обобщения имеющихся разрозненных материалов без всякого рода рекомендаций по выбору оборудования той или иной фирмы, поскольку такой выбор зависит от большого количества факторов и должен быть сделан непосредственно заказчиком или проектировщиком конкретного объекта.

Настоящее учебное пособие посвящено вакуумным выключателям. В нем рассмотрены физика возникновения электрической дуги в вакууме, способы и средства гашения дуги, особенности конструкции и гашения дуги в вакуумных камерах и особенности конструкции вакуумных выключателей, представленных на рынке коммутационного оборудования.

## 1 Особенности процесса разряда в вакууме

Электрическая прочность вакуума значительно выше прочности других сред, применяемых в выключателях. Объясняется это увеличением длины среднего свободного пробега электронов, атомов, ионов и молекул по мере уменьшения давления. В вакууме длина свободного пробега частиц превышает размеры вакуумной камеры. В этих условиях удары частиц о стенки камеры происходят значительно чаще, чем соударения между частицами. На рисунке 1.1 показаны зависимости пробивного напряжения вакуума и воздуха от расстояния между электродами диаметром 3/8" из вольфрама.

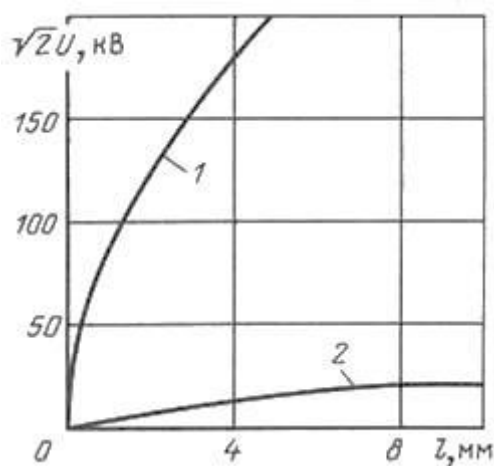


Рисунок 1.1 – Зависимость пробивного напряжения вакуума (1) и воздуха (2) от расстояния между электродами

При столь высокой электрической прочности расстояние между контактами может быть очень малым (2 см - 2,5 см), поэтому размеры камеры могут быть также относительно небольшими [1].

Вакуум является идеальной изоляционной средой, так как вероятность ионизации молекул газа путём соударения с ними электронов чрезвычайно мала. Однако опыт показывает что при достаточно большой напряжённости электрического поля даже в самом совершенном техническом вакууме появляется электрический ток, который быстро возрастает при дальнейшем увеличении напряжённости поля вплоть до пробоя.

При весьма малых расстояниях между электродами (доли миллиметра) разряд в вакууме происходит вследствие автоэлектронной эмиссии с поверхности катода. Разогревание поверхности электродов вследствие прохождения тока автоэлектронной эмиссии приводит к их испарению, в результате чего происходит пробой изоляционного промежутка в парах металла.

При увеличении длины разрядного промежутка разрядная напряжённость быстро уменьшается (рисунок 1.2), вследствие так называемого эффекта полного напряжения [2]. Накапливая энергию,

измеряемую сотнями тысяч электрон-вольт, электроны при торможении у поверхности анода излучают фотоны с большой энергией. Эти фотоны, достигая катода, освобождают новые электроны. В результате число участвующих в разряде электронов быстро увеличивается, что в итоге приводит к образованию искры.

При  $p < 0,01$  Па разрядные напряжения практически не зависят от давления газа. При  $p > 0,1$  Па - 1 Па разрядные напряжения быстро уменьшаются (рисунок 1.3), причём пороговое давление быстро уменьшается при увеличении длины разрядного промежутка  $l$  ( $l = 2$  мм;  $2 - l = 3$  мм; однородное поле; электроды из бескислородной меди). При повторных пробоях вакуумного промежутка разрядное напряжение возрастает вследствие так называемого эффекта тренировки электродов так же, как и для сжатых газов. Рост разрядных напряжений происходит до 10-100 разрядов. При этом разрядное напряжение увеличивается почти вдвое по сравнению с первым разрядом.

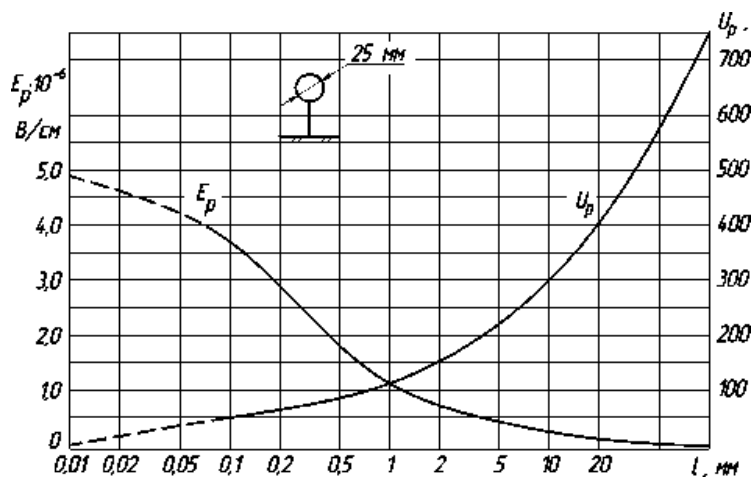


Рисунок 1.2 – Изменение напряженности электрического поля и разрядного напряжения при увеличении длины разрядного промежутка

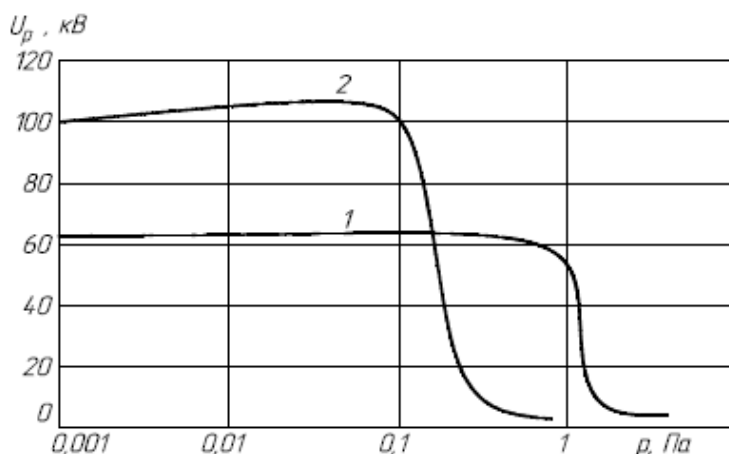


Рисунок 1.3 – Изменение разрядного напряжения от давления

Материал электродов существенно влияет на величину разрядных напряжений изоляционных промежутков в вакууме. По степени понижения

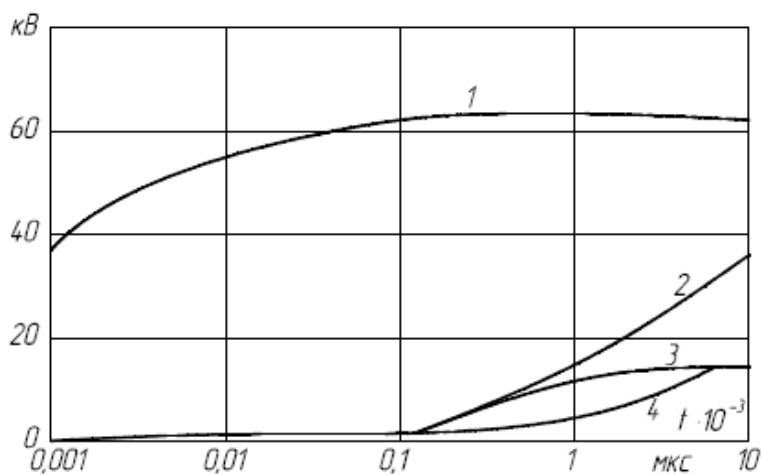
разрядных напряжений материалы можно расположить в такой последовательности: вольфрам, молибден, тангал, нержавеющая сталь, железо, никель, алюминий, медь, свинец, углерод.

Разрядные напряжения вакуумного промежутка длиной 1 мм с тренированными электродами из нержавеющей стали в три раза больше, чем при алюминиевых или медных электродах. При увеличении площади электродов разрядные напряжения понижаются.

В дугогасительных устройствах вакуумных выключателей абсолютное давление находится в диапазоне  $10^{-10}$  -  $10^{-3}$  Па. Горение и гашение электрической дуги в вакууме имеет некоторые особенности. При расхождении контактов ВДК в начальный момент между ними образуется мостик из расплавленного металла, который нагревается проходящим током до температуры кипения и испаряется.

Ионизация электронами паров металла, которые генерируют с поверхности электродов, приводит к образованию вакуумной дуги. При прохождении тока через нуль дуга гаснет и, если нарастание электрической прочности промежутка между контактами происходит быстрее восстановления на нём напряжения, то повторного зажигания дуги не произойдёт.

Чрезвычайно интенсивная деионизация дугового промежутка обеспечивает быстрое восстановление электрической прочности в вакууме после погасания дуги. На рисунке 1.4 приводятся зависимости восстановления электрической прочности промежутка от времени, прошедшего после нуля тока, для вакуума и основных дугогасящих сред.



1- вакуум, 2- элегаз, 3 - азот, 4- водород.

Рисунок 1.4 – Процесс восстановления электрической прочности для различных сред

В вакууме электрическая дуга существует либо в виде рассеянной, «диффузной», дуги при токах до нескольких тысяч ампер, либо в виде

концентрированной, «сжатой», дуги при больших значениях тока. Граничный ток, при котором дуга переходит из одного вида в другой, зависит в значительной степени от материала и формы контактов, а также от скорости изменения тока. Эти же факторы влияют и на скорость восстановления электрической прочности промежутка между контактами в вакууме. Следовательно, подбирая соответствующим образом материал контактов, их оптимальную форму и ход, можно получить вакуумную дугогасительную камеру на различные параметры.

Диффузная дуга имеет значительно меньшую постоянную времени по сравнению с постоянной времени сжатой дуги, которая может достигать сотен микросекунд и даже нескольких миллисекунд. Вследствие того, что в вакууме гашение диффузной дуги осуществить значительно легче, чем сжатой дуги, при разработке вакуумных дугогасительных устройств необходимо так конструировать контакты, чтобы дуга на протяжении определённого времени до нуля тока была диффузной.

Таким образом, разряд в вакууме начинается в результате эмиссии заряженных частиц с поверхности электрода.

В металле распределение электронов по энергии описывается уравнением [3,4,5].

$$f(w, T)dw = \frac{2\pi(2m_e)^{3/2} w^{1/2} dw}{h^3 (1 + \exp[w - W_{Fe} / kT])}, \quad (1)$$

где  $m_e$  – масса электрона;

$h$  – постоянная Планка;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура;

$n_e$  – концентрация свободных электронов в металле;

$w$  – энергия электрона;

$W_{Fe}$  – энергия Ферми равная:

$$W_{Fe} = \frac{h^2}{8m_e} \left( \frac{3n_e}{\pi} \right)^{2/3} \left[ 1 - \frac{8}{3} \left( \frac{\pi}{3n_e} \right)^{4/3} \frac{\pi m_e kT}{h^4} \right]. \quad (2)$$

При температуре металла  $T = 0^\circ K$  все электроны имеют энергию меньшую или равную энергии Ферми, но при повышении температуры небольшая часть электронов приобретает энергию, большую  $W_{Fe}$ . Самопроизвольному выходу электронов из твердого тела препятствует потенциальный барьер, обусловленный силами и взаимодействием электронов с узлами кристаллической решетки. Энергию, которую надо затратить для удаления из кристалла электрона с уровня Ферми, называют работой выхода

$W_a$ , с нижнего уровня - полной работой выхода  $W_o$ . Для удаления электрона с уровня Ферми на расстояние от поверхности катода требуется затратить энергию

$$w(x) = W_a - e_o^2 / (16\pi\epsilon_o x). \quad (3)$$

Вычитаемое в выражении учитывает так называемые силы электростатического изображения, которые действуют на электрон, отстоящий от края кристалла на расстояние  $x$ . Во внешнем поле с напряженностью  $E$  зависимость вблизи катода принимает вид:

$$w(x) = W_a - e_o^2 / (16\pi\epsilon_o x) - e_o E x. \quad (4)$$

Снижение высоты барьера составляет,  $\Delta w = \sqrt{e_o^3 E / (\pi\epsilon_o)} / 2$ , а работа выхода уменьшается до значения  $W_a^*$  (эффективная работа выхода):

$$W_a^* = W_a - \Delta w. \quad (5)$$

Как правило, поверхность контактов имеет большое число микронеровностей, и они прилегают друг к другу не всей плоскостью, а несколькими точками. В первые мгновения расхождения контактов площадь соприкосновения электродов сохраняется, но при этом стремительно уменьшается. Также стремительно поднимается температура мест соприкосновения, причем к моменту отрыва поверхностей друг от друга металл переходит в жидкое состояние и между расходящимися контактами возникают мостики из расплавленного металла.

Дальнейшее расхождение контакта сопровождается сжатием сечения мостиков, увеличением температуры и давления. Стартовый этап заканчивается взрывом мостика и переходом к разряду в парах металла. В этих условиях преимущественной составляющей тока является ток термоэлектронной эмиссии.

Плотность тока термоэлектронной эмиссии можно найти, используя распределение электронов в металле по энергиям. Число электронов в элементарном объеме пространства скоростей  $dv_x dv_y dv_z$  можно определить по выражению:

$$dn_e = \frac{2(m_e / h)^3 dv_x dv_y dv_z}{1 + \exp\left[\frac{mv^2 / 2 - W_{Fe}}{kT}\right]}. \quad (6)$$

Тогда плотность эмиссионного тока будет равна:

$$j = 2e_o(m_e h)^3 \int_{-\infty}^{\infty} dv_y \int_{-\infty}^{\infty} dv_x \int_{\sqrt{2W_a/m_e}}^{\infty} \frac{v_x D(v_x) dv_x}{1 + \exp\left[\frac{mv^2/2 - W_{Fe}}{kT}\right]}, \quad (7)$$

где  $D(v_x)$ - коэффициент прозрачности (отношение числа прошедших сквозь барьер электронов к числу падающих), приближенно равный 1.

Поскольку  $(w - W_{Fe}) \gg kT$ , единицей по сравнению величиной  $\exp\left[\frac{(w - W_{Fe})}{kT}\right]$  можно пренебречь. Проводя интегрирование, получим:

$$j = 4\pi e_o m_e k^2 T^2 \exp\left[-W_a^*/(kT)\right] / h^3 = AT^2 \exp\left[-W_a^*/(kT)\right], \quad (8)$$

где  $T$  – температура катода;

$k$  – постоянная Больцмана;

$A$  – постоянный коэффициент;

$W_a^*$  – эффективная работа выхода.

Работа выхода из электрода зависит как от материала, так и от состояния поверхности катода, поэтому плотность тока также зависит от этих факторов. Кроме этого, имеет место незначительный ток, связанный с фотоэффектом. Фотоэффект, т.е. эмиссия электронов из катода под действием светового или иного излучения, происходит при энергии фотона, большей эффективной работы выхода

$$h\nu \geq W_a^*. \quad (9)$$

При этом нужно иметь в виду, что вероятность эмиссии электрона под действием фотона с энергией большей  $W_a^*$ , много меньше единицы. Эту вероятность называют квантовым выходом

$$\eta_\phi = N_e / N_\phi, \quad (10)$$

где  $N_e N_\phi$  – число электронов и фотонов.

Плотность фототока зависит не только от энергии фотона, но и температуры и состояния поверхности катода.

Вторым по плотности является ток автоэлектронной эмиссии. Автоэлектронная эмиссия из металла в вакуум наблюдается при напряженностях электрического на поверхности  $E = 10^8 - 10^9 \text{ В/м}$ .

Сильное электрическое поле у катода может возникнуть не только вследствие роста напряженности между электродами, но и вследствие образования положительного объема заряда вблизи катода. Поверхность катода обычно бывает неровной и неоднородной, на отдельных участках имеет место и заметный ток автоэлектронной эмиссии может возникнуть уже при средней напряженности порядка  $10^7$  В/м.

При автоэлектронной эмиссии электрон «туннелирует» сквозь барьер без изменения энергии. Прозрачность треугольного барьера может быть рассчитана по формуле:

$$D(E, w_x) = D_o \exp\left[-8\pi\sqrt{2m_e}(W_o - w_x)^{3/2} / (3he_oE)\right], \quad (11)$$

где  $m_e$  – масса электрона;  
 $h$  – постоянная Планка;  
 $e_o$  – заряд электрона;  
 $E$  – напряженность электрического поля;  
 $w_x$  – энергия электрона в металле, движущегося к катоду ( $w_x = m_e v_x^2 / 2$ );  
 $W_o$  – полная работа выхода;  
 $D_o$  – коэффициент, характеризующий материал катода.

Плотность тока автоэлектронной эмиссии при температуре  $T=0^\circ K$  можно определить из выражения:

$$j = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\sqrt{2W_o/m_e}} e_o v_x D(v_x) f(w_x, T) dv_x dv_y dv_z. \quad (12)$$

Поскольку электроны при  $T=0^\circ K$  не могут иметь энергию, большую  $W_{Fe}$ , справедливо выражение:

$$(m_e v_x^2 / 2 + m_e v_z^2 / 2 \leq W_{Fe}) , \quad (13)$$

и следовательно,

$$v_y^2 + v_z^2 \leq (W_{Fe} - w_x) / m_e. \quad (14)$$

Полученному неравенству удовлетворяют координаты точек круга радиусом  $r = \sqrt{2(W_{Fe} - w_x) / m_e}$ .

Тогда двойной интеграл по  $v_y$  и  $v_z$  будет равен:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dv_y dv_x = \iint_{v_y^2 + v_z^2} \pi^2 = 2\pi(W_{Fe} - w_x)/m_e. \quad (15)$$

Подставив (15) в выражение (12), воспользовавшись равенством  $m_e v_x dv_x = dw_x$  и заменив пределы интегрирования, получим

$$j = \frac{4\pi e_o m_e D_o}{h^3} \int_o^{W_{Fe}} (W_{Fe} - w_x) \left( \frac{-8\pi \sqrt{2m_e (W_o - w_x)^{3/2}}}{3he_o E} \right) dw_x. \quad (16)$$

Введем обозначение  $\delta = (W_{Fe} - w_x)$ ,  $d\delta = -dw_x$  и, принимая во внимание, что  $w_a = w_o - W_{Fe}$  и  $W_o - w_x = W_a + \delta$ , находим,

$$(W_a + \delta)^{3/2} = W_a^{3/2} (1 + \delta/W_a)^{3/2}. \quad (17)$$

Отношение  $\delta/W_a \ll 1$ , поэтому разложим выражение (17) в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами, получим:

$$(W_a + \delta)^{3/2} \approx W_a^{3/2} + 3W_a^{3/2} \delta/2. \quad (18)$$

После подстановки (18) в выражение для плотности тока автоэлектронной эмиссии (7) оно примет вид:

$$j = \frac{4\pi e_o m_e D_o}{h^3} \exp\left(\frac{-8\pi_e W_a^{3/2} \sqrt{2m_e}}{3he_o E}\right) \int_o^{W_{Fe}} \delta \exp\left(\frac{-4\pi_e \sqrt{2m_e} W_a^{1/2} \delta}{he_o E}\right) d\delta. \quad (19)$$

Верхний предел можно взять равным бесконечности, так как подинтегральное выражение быстро затухает. Тогда из (19) получим:

$$j = e_o^3 D_o E^2 \exp\left[-8\pi_e \sqrt{2m_e} W_a^{3/2} / (3he_o E)\right] / (8h\pi W_a). \quad (20)$$

Введя обозначение  $A = De_o^3 / (8hW_a\pi)$  и  $B = 8\pi \sqrt{2m_e} / (3he_o)$ , получим для плотности тока автоэлектронной эмиссии

$$j = AE^2 \exp(-BW_a^{3/2} / E), \quad (21)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля на поверхности катода;

$W_a$  – работа выхода;

$A, B$  – константы.

При учете эффекта Шоттки, заключающегося в снижении высоты потенциального барьера, прозрачность барьера увеличивается. Для учета этого обстоятельства в формулу (11) вводят так называемую функцию Нордгейма  $Q(\xi)$ , зависящую от отношения  $\xi = \Delta W_a / W_a$  и изменяющуюся от 1 до 0 при увеличении  $\xi$  от 0 до 1:

$$D(E, w_x) = D_o \exp\left(-8\pi\sqrt{2m_e}W_a^{3/2}Q(\xi)\right)/(3he_oE). \quad (22)$$

С учетом увеличения прозрачности барьера упрощенная формула, удобная при практических расчетах плотности тока автоэлектронной эмиссии при  $T=0^\circ K$ , имеет вид:

$$j_A(0) \cong 1,4 \cdot 10^{-6} \left(E^2 / W_a\right) \cdot 10^{4,39\sqrt{W_a}} \cdot 10^{-2,82 \cdot 10^{-7} W_a^{3/2}/E}, \quad (23)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в В/см;  
 $W_a$  – работа выхода из металла в эВ,  $j_A(0)$  в А/см<sup>2</sup>.

Повышение температуры катода приводит к росту плотности автоэлектронной эмиссии  $j_A(T)$ , так как часть электронов будет иметь энергию, большую  $W_{Fe}$ . Увеличение плотности тока автоэлектронной эмиссии при повышении температуры можно оценить по формуле:

$$j_A(T) / j_A(0) = 1 + 1,4 \cdot 10^8 W_a T^2 / E^2. \quad (24)$$

Эмиссия электронов может происходить при бомбардировке катода медленными (потенциальная ионно-электронная эмиссия) или быстрыми, имеющими энергию в несколько килоэлектронвольт (кинетическая ионно-электронная эмиссия) положительными ионами.

При сближении положительного иона с металлом ширина потенциального барьера уменьшается настолько, что становится возможным туннелирование электрона на свободный нормальный энергетический уровень положительного иона.

В результате этого образуется нейтральная частица. При нейтрализации выделяется энергия, равная разности энергий, необходимой для ионизации частицы  $W_u$  и энергии, которую имел электрон в металле,  $w_x$ .

Эмиссия электрона в вакуум возможна, если выделившаяся энергия будет больше работы выхода:  $W_u - w_x > W_a$  или  $W_u > W_a + w_x$ . Поскольку  $w_x > W_a$ , эмиссия электрона имеет место лишь при выполнении условия  $W_u \geq 2W_a$ .

Коэффициент ионно-электронной эмиссии, равный отношению плотностей электронного и ионного токов  $K_{ue} = i_e / i_u$ , при кинетической энергии иона в несколько электрон-вольт слабо зависит от этой энергии.

Ствол разряда на стартовых этапах имеет проводимость значительно большую, чем проводимость у элегазовых и масляных выключателей, что в совокупности с конструктивными решениями контактной системы обеспечивает перенапряжения не превышающие допустимые.

Однако после прохождения тока через ноль возникают многократные пробои, которые могут при определенных условиях привести к эскалации перенапряжений. При фиксированной скорости восстановления диэлектрической прочности условия для первого и последующих пробоев зависят от момента начала движения контактов  $t_{откл}$ , отсчитываемого от момента прерывания тока.

Важнейшим явлением, влияющим на возможность возникновения перенапряжений в условиях, когда контакты холодные, является взрывная автоэлектронная эмиссия. Это происходит, как правило, при включении после длительного перерыва.

В этих условиях отсутствуют, по крайней мере, на первом этапе движения контактов, составляющие термоэлектронной и фотоэлектронной эмиссий.

Разряд возникает с микронеровностей контактной системы. Через некоторое время задержки после начала эмиссии происходят микровзрывы на остриях катода, при этом образуются плазменные сгустки, катодные факелы, расширяющиеся со скоростью порядка  $10^4$  м/с, и плотность тока быстро нарастает.

Быстрый рост плотности тока обусловлен термоэлектронной эмиссией из плазменного катодного факела. Еще до достижения катодным факелом анода навстречу ему начинает двигаться анодный факел, образующийся в результате бомбардировки анода ускоренными электронами. Длительность импульса тока взрывной эмиссии  $t_{вз}$  определяется основным временем перекрытия промежутка катодным факелом:

$$t_{вз} = d / v, \quad (25)$$

где  $d$  – расстояние между электродами;

$v$  – скорость распределения катодного факела.

Явление взрывной эмиссии в вакуумном выключателе провоцирует многократные пробои до окончания работы выключателя.

При размыкании контактов в вакуумной камере, весь ток устремляется к последней оставшейся точке контакта, вызывая интенсивный местный нагрев в этой точке. При дальнейшем разведении контактов формируется мостик из расплавленного металла, который, вследствие огромной плотности тока в нем, мгновенно разогревается и взрывается, создавая дугу в среде ионизированных металлических паров, образовавшихся в результате взрыва. Ионизированный металлический пар является хорошим проводником тока, и в межэлектродном

промежутке начинается устойчивый дуговой разряд. Таким образом, вакуумная дуга представляет собой в среде металлического пара.

Носители тока попадают в межэлектродный промежуток с катода через множественные точечные источники тока, называемые катодными пятнами. Через каждое пятно протекает ток 60-100 ампер, что при размерах катодного пятна от нескольких микрон до нескольких десятков микрон создаст плотность тока до ста миллионов ампер на квадратный сантиметр.

Огромная плотность тока разогревает металл электрода в катодных пятнах: он кипит и испаряется, давление в этих точках достигает десятков атмосфер, а температура - нескольких тысяч градусов. При таких температурах и давлениях из катодных пятен истекают сверхзвуковые струи плотной, сильно ионизированной плазмы, через которую и замыкается ток на анод.

Катодные пятна находятся в непрерывном хаотическом движении по поверхности катода. Эффект движения пятен создается из-за непрерывного процесса исчезновения (отмирания) одних пятен и возникновения других. Каждое пятно имеет ограниченное «время жизни», новые пятна рождаются в месте отмирания «старого» пятна, зачастую новые пятна появляются путем деления уже существующего пятна на два и более.

Количество пятен, существующих на катоде в определенный момент времени, определяется амплитудой тока дуги и материалом катода. Так, например, каждое пятно на медном электроде несет ток порядка 100 А. Таким образом, дуга, образуемая на медном электроде током 1000 А, создаст примерно 10 катодных пятен.

Если рассматривать полупериод переменного тока (рисунок 1.5), то можно заметить, что одновременно с ростом уровня тока будет расти и количество пятен.

По мере уменьшения тока, количество пятен будет уменьшаться до тех пор, пока непосредственно перед естественным переходом тока через ноль не останется только одно пятно.

При достижении током предельной минимальной величины, которая называется током среза и зависит, в основном, от материала катода, последнее катодное пятно прекращает свое существование. При этом ток через межэлектродный промежуток практически прекращается, а пары металла конденсируются на электродах за время около 10 микросекунд.

После исчезновения тока на разведенных электродах начинает восстанавливаться напряжение сети, этот процесс занимает примерно 50-60 микросекунд, то есть к моменту восстановления напряжения носители заряда в межэлектродном промежутке отсутствуют, и он полностью восстанавливает свои диэлектрические свойства.

Вакуумные дуги имеют несколько форм, режимов существования. Для определения режима горения вакуумной дуги используется слово «мода». Проявление вакуумной дуги, ее вид, зависит от моды. Мода, в свою очередь, зависит от величины тока и, в известной степени, от размера контактов.

При меньших токах дуга принимает диффузную моду, которая характеризуется наличием одного или нескольких катодных пятен. Остальная часть дуги светится гораздо слабее, контрастируя с ярко светящимися катодными пятнами.

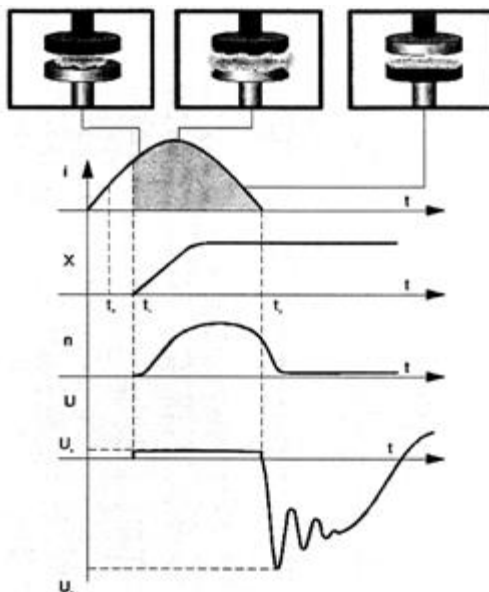


Рисунок 1.5 – Влияние величины тока на количество пятен

Дуга называется диффузной, потому что практически весь объем межэлектродного промежутка равномерно заполнен раскаленными светящимися струями конической формы, берущими начало в катодных пятнах и омывающими анод. По мере роста тока дуга расширяется, светящаяся плазма заполняет практически весь объем камеры.

По сравнению с дугами в газах, напряжение вакуумной дуги довольно низкое, обычно в пределах 20 В - 30 В для токов порядка нескольких сот ампер на медных электродах, таким образом, энергия, выделяемая на электродах в процессе горения дуги очень невелика. Большая часть падения напряжения дуги приходится на прикатодную область, чрезвычайно короткий участок, начинающийся у катодного пятна в непосредственной близости к поверхности катода. Почти все остальное напряжение проявляется в прианодной области.

Наличие катодных пятен жизненно необходимо для существования вакуумной дуги, поскольку они являются источником плазмы. Анод, в отличие от катода, ведет себя как положительный зонд, вытягивающий из плазмы значительный ток, необходимый для удовлетворения потребностей внешней цепи. Межэлектродная плазма обеспечивает проводящую среду, необходимую для переноса тока от катода к аноду.

При дальнейшем увеличении тока в дуге происходят неожиданные существенные изменения характера дуги. Плазма вместо того, чтобы равномерно омывать анод, как было описано ранее, фокусируется на небольшой области этого электрода. Это анодное пятно, обычно находящееся

на остром краю контакта и пребывающее в расплавленном состоянии, обычно играет ключевую роль в пробое промежутка при попытке восстановления напряжения.

Катодные пятна при этом имеют тенденцию к группированию, а сама дуга принимает вид ярко светящегося жгута. Такая мода дуги называется контрагированной. Контрагированная дуга вызывает гораздо большую эрозию обоих электродов, которая в количественном отношении зависит от амплитуды тока и длительности его протекания, приблизительно можно утверждать, что в этом режиме эрозия на один или два порядка выше, нежели катодная эрозия диффузной дуги.

Продуктами вакуумной дуги являются металлическая плазма и нейтральные пары металла. Плазма истекает из катодных пятен, а пары металла из окружающих пятна областей с более низкой температурой и капель расплавленного металла. При больших токах анод также разогревается достаточно сильно, чтобы испускать нейтральный металлический пар.

Необычайно высокая отключающая способность вакуумных коммутационных аппаратов напрямую связана с чрезвычайно быстрым рассеянием продуктов горения дуги из-за высоких перепадов их концентрации в направлении от оси камеры к ее оболочке, с одновременной их конденсацией на контактах и экранах. Весь этот процесс занимает буквально несколько микросекунд.

При контрагированной моде дуги в ней выделяется больше энергии, кроме того, этот режим сопровождается образованием на аноде одного или нескольких очагов расплавленного металла. Все это приводит к резкому увеличению количества металлического пара, выбрасываемого в промежуток.

Это затрудняет отключение тока при переходе его через нуль, так как скорость восстановления электрической прочности промежутка в таких условиях уступает скорости нарастания напряжения, вакуумный зазор вновь пробивается и через него протекает полуволна тока противоположной полярности. Это явление считается отказом отключения тока. Безусловно, вакуумная камера любой конструкции имеет предел отключаемого тока, выше которого отключение невозможно, и этот предел напрямую связан с состоянием анода к моменту восстановления напряжения, поскольку тот несет основную тепловую нагрузку в процессе горения дуги, а к моменту восстановления напряжения полярность на контактах меняется и анод становится катодом.

Таким образом, создание благоприятных условий для успешного отключения тока заключается в предотвращении возникновения анодных пятен вследствие контрагирования дуги, которое наблюдается уже при уровнях отключаемого тока 8-10 кА. Эта величина является физическим пределом отключения для обычных торцевых контактов, причем увеличение размера (площади) контактов при этом никаких результатов не дает, потому что тепловая нагрузка от контрагированной дуги приходится не на всю поверхность контакта, а лишь на пятно размером  $2 \text{ см}^2 - 3 \text{ см}^2$ .

Для повышения отключающей способности необходимо совершенствование контактной системы с целью предотвращения возникновения анодного пятна. В настоящее время в мировой практике получили широкое распространение несколько разновидностей контактных систем.

Самой простой, технологичной и дешевой является контактная система торцевого типа. Изготовленная, как правило, из меди и снабженная контактными накладками из композиции «медь-хром» для увеличения устойчивости к свариванию и износостойкости, она не в состоянии отключать токи с действующим значением более 10 килоампер, однако выпускается многими производителями вакуумных камер для выключателей на соответствующие токи.

Наложение продольного (аксиального) магнитного поля на горящую дугу ограничивает движение катодных пятен таким образом, что почти на всех стадиях своего существования дуга существует в диффузном режиме, то есть энергия носителей заряда равномерно распределяется по всей поверхности анода, что позволяет избежать локальных перегревов. При этом отключающая способность, по сравнению с электродами поперечного поля того же диаметра возрастает почти в три раза.

На рисунке 1.6 показаны некоторые разновидности конструкций электродов с аксиальным магнитным полем. Электроды такого типа широко используются в камерах, когда необходимо получить высокую отключающую способность в минимальных габаритах.

Контактные системы данного типа устанавливают в своих камерах такие фирмы, как Toshiba, Holes, Таврида-Электрик.

При использовании электродов с продольным магнитным полем напряжение на дуге, а, следовательно, и тепловая нагрузка электродов минимальны, что существенно повышает отключающую способность систем такого типа.

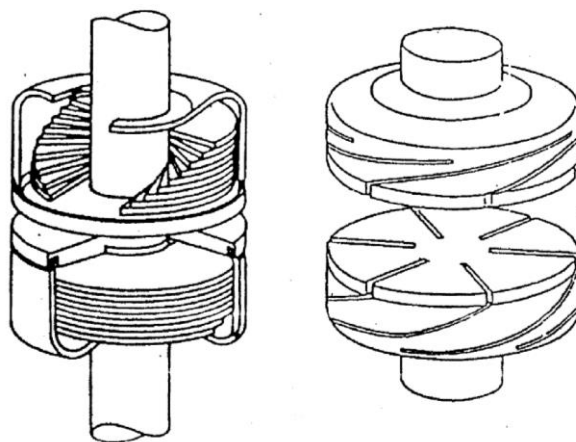


Рисунок 1.6 – Конструкции электродов с аксиальным магнитным полем

Несмотря на то что вакуум является прекрасным диэлектриком, непосредственно после отключения тока условия в зазоре между контактами вакуумного выключателя уже не такие, как до того.

Поверхности контактов «замусорены» продуктами горения дуги, могут оставаться отдельные раскаленные пятна, продолжающие источать пары металла, а в худшем случае - эмитировать электроны.

По этой причине, если на сегодня проблем создания одnorазрывных вакуумных аппаратов для классов напряжения 10 кВ - 35 кВ нет, то для более высоких напряжений необходимы другие решения.

На рисунках 1.7-1.10 показаны этапы возникновения, горения и погасания дуги в вакуумной камере [6].

С началом движения приводом контактов на разъединение между ними появляется промежуток, сразу содержащий вакуум. Внутри него начинается процесс испарения нагретого металла контактных площадок. Через эти пары продолжает протекать ток нагрузки. Он инициирует образование дополнительных электрических разрядов, создающих дугу в среде вакуума, продолжающую развиваться за счет испарения и отрыва паров металла.

Под действием приложенной разности потенциалов образованные ионы движутся в определенном направлении, создавая плазму. В ее среде продолжается протекание электрического тока, идет дальнейшая ионизация.

Поскольку выключатель работает с переменным электрическим током, то его направление в течение каждого полупериода меняется на противоположное. При переходе синусоиды через ноль ток отсутствует. За счет этого дуга резко гаснет и обрывается, а отторгнутые ионы металла прекращают выделяться и за  $7 \div 10$  микросекунд полностью оседают на ближайших поверхностях контактов или остальных частях дугогасящей камеры.

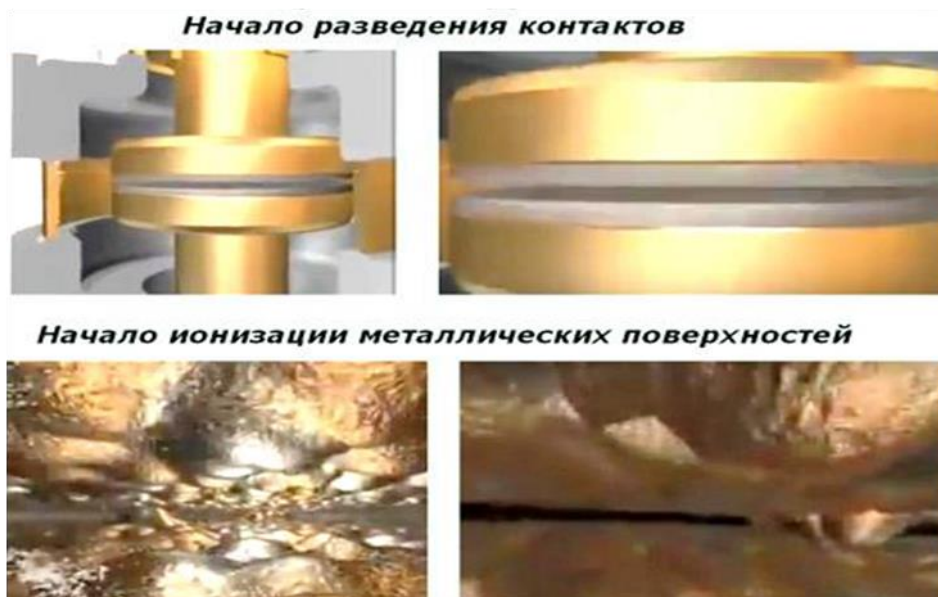


Рисунок 1.7

**Развитие ионизации, образование плазмы**

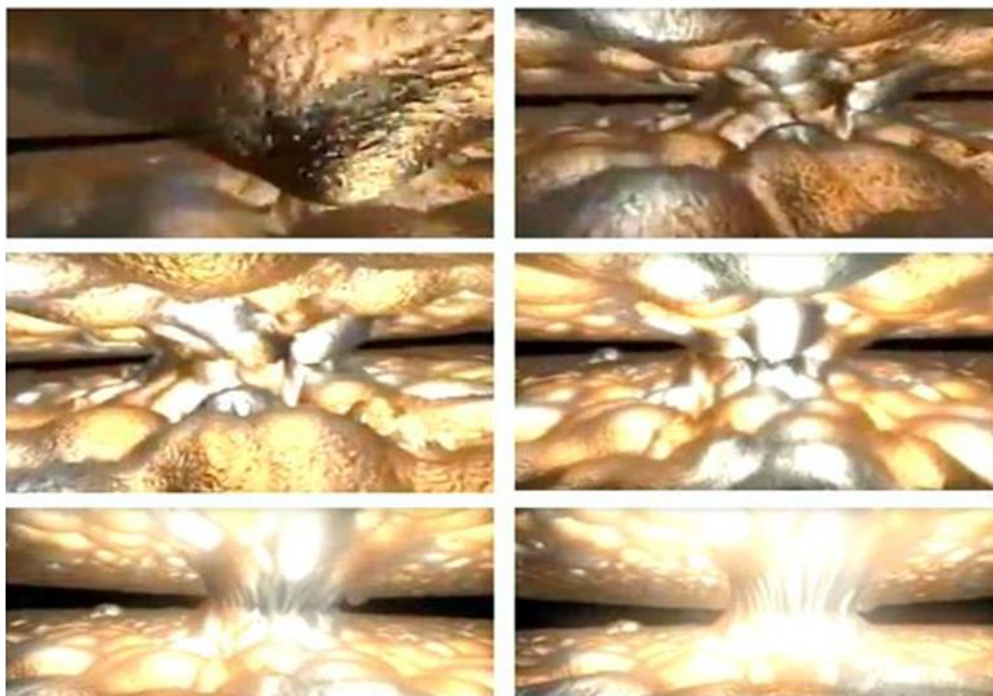


Рисунок 1.8

**Различные этапы образования плазмы**



Рисунок 1.9

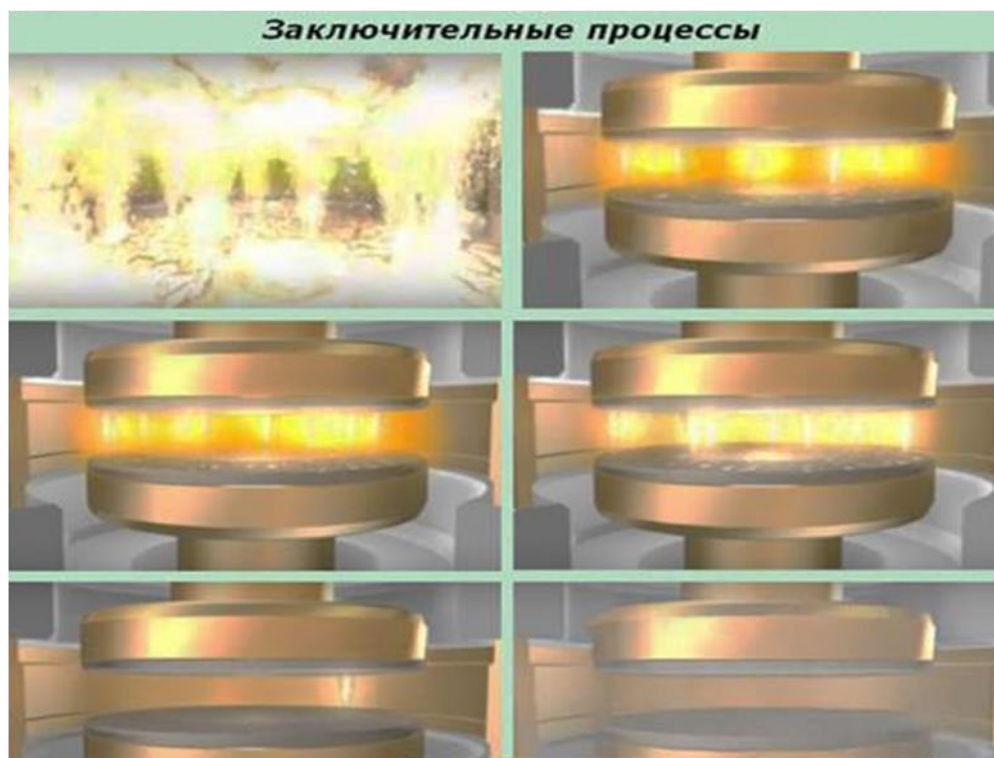


Рисунок 1.10

В этот момент электрическая прочность промежутка между силовыми контактами, заполненная вакуумом, практически мгновенно восстанавливается, чем обеспечивается окончательное отключение тока нагрузки. В следующем полупериоде синусоиды электрическая дуга возникнуть уже не может.

Таким образом, для прекращения действия электрической дуги в среде вакуума при размыкании силовых контактов достаточно переменному току сменить свое направление.

## 2 Вакуумные дугогасительные камеры и их особенности

В настоящее время вакуумные выключатели стали доминирующими аппаратами для электрических сетей с напряжением 6 кВ - 36 кВ. Так, доля вакуумных выключателей в общем количестве выпускаемых аппаратов в Европе и США достигает 70 %, в Японии – 100 %. В России эта доля имеет постоянную тенденцию к росту, и в 1997 году превысила 50 %.

В литературе широко применяется двойная аббревиатура для обозначения вакуумных дугогасительных камер: ВДК - вакуумная дугогасительная камера и КДВ - камера дугогасительная вакуумная. Кроме этого, каждая фирма имеет свои модификации.

Первые разработки вакуумных выключателей были начаты в 30-е годы XX века. Действующие модели могли отключать небольшие токи при напряжениях до 40 кВ.

Достаточно мощные вакуумные выключатели в те годы так и не были созданы из-за несовершенства технологии изготовления вакуумной аппаратуры и, прежде всего, из-за возникших в то время технических трудностей по поддержанию глубокого вакуума в герметизированной камере.

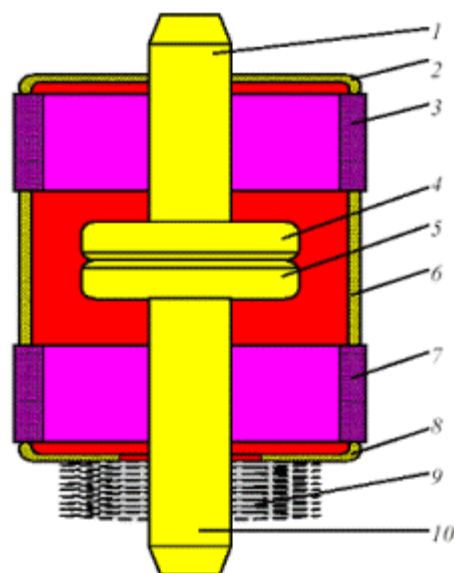
Для создания надежно работающих вакуумных дугогасительных камер, способных отключать большие токи при высоком напряжении электрической сети, потребовалось выполнить обширную программу исследовательских работ. В ходе проведения этих работ примерно к 1957 г. были выявлены и научно объяснены основные физические процессы, происходящие при горении дуги в вакууме.

Переход от единичных опытных образцов вакуумных выключателей к их серийному промышленному производству занял ещё два десятилетия, поскольку потребовал проведения дополнительных интенсивных исследований и разработок, направленных, в частности, на отыскание эффективного способа предотвращения опасных коммутационных перенапряжений, возникавших из-за преждевременного обрыва тока до его естественного перехода через нуль.

На решение сложных проблем, связанных с распределением напряжения и загрязнением внутренних поверхностей изоляционных деталей осаждавшимися на них парами металла, проблем экранирования и создания новых высоконадежных сильфонов и др. понадобилось еще время.

В настоящее время в мире налажен промышленный выпуск высоконадежных быстродействующих вакуумных выключателей, способных отключать большие токи в электрических сетях среднего (6, 10, 35 кВ) и высокого напряжения (до 220 кВ включительно).

На рисунке 2.1 показана принципиальная конструктивная схема вакуумной дугогасительной камеры, а на рисунке 2.2 - типичная вакуумная камера (КДВ) компании Siemens AG.



1,10- неподвижный и подвижный контакты; 2, 8-верхняя и нижняя металлические крышки; 3, 7- нижняя и верхняя вакуумноплотные оболочки, спаянные из керамических и стеклянных изоляторов; 4, 5- контакты; 6- металлический экран; 9- сиффон.

Рисунок 2.1 –Конструктивная схема вакуумной дугогасительной камеры

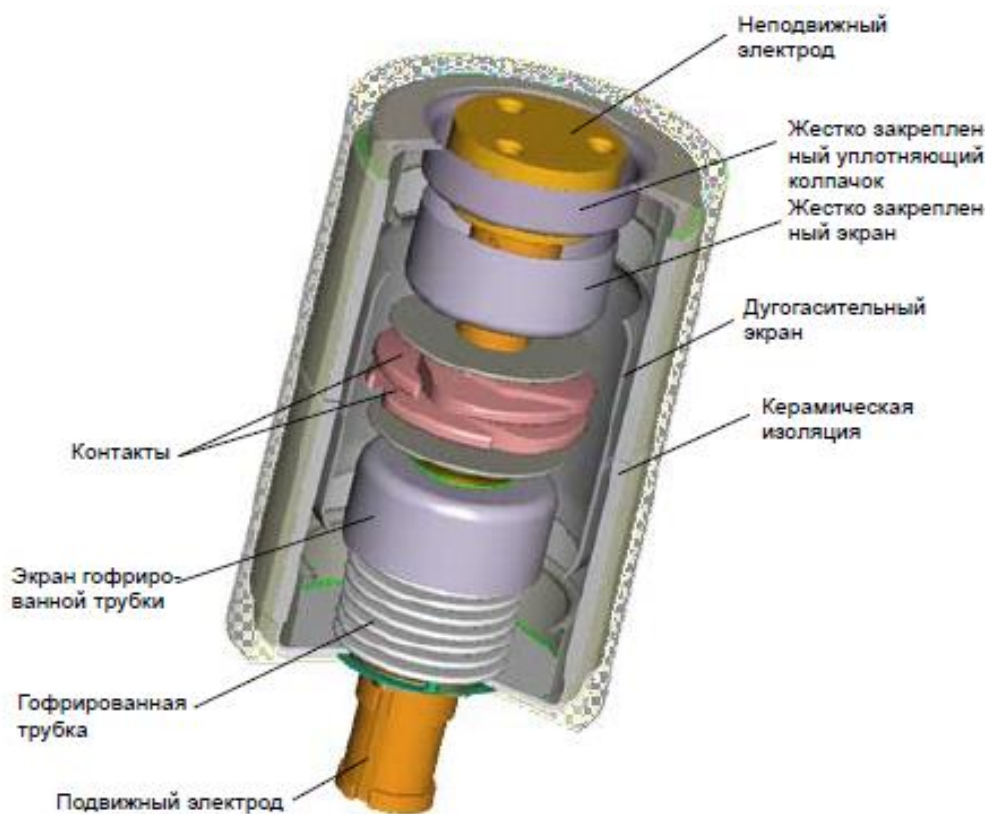


Рисунок 2.2 –Конструкция вакуумной камеры КДВ компании Siemens

В камере КДВ зазор между контактами составляет 6 мм - 20 мм в зависимости от номинального напряжения. Контакты изготовлены из специального сплава, благодаря чему снижен износ при отключении токов короткого замыкания и токов перегрузки. Конструкция обоих контактов обеспечивает простое гашение дуги.

В 2004 г. компания Siemens AG. совместно с предприятием ОАО «Самарский трансформатор» наладила выпуск в России вакуумных выключателей ВВСТ с модифицированными камерами АМФ. Они обладают меньшими массогабаритными показателями, лучшим коммутационным ресурсом и прогрессируют в сторону увеличения токов отключения. Кроме того, для контактной системы использован сплав CuCr, на порядок превосходящий другие контактные материалы и пригодный почти для всех коммутационных задач [7].

Конструкция вакуумной камеры и контактной системы камеры АМФ. приведены на рисунке 2.3.

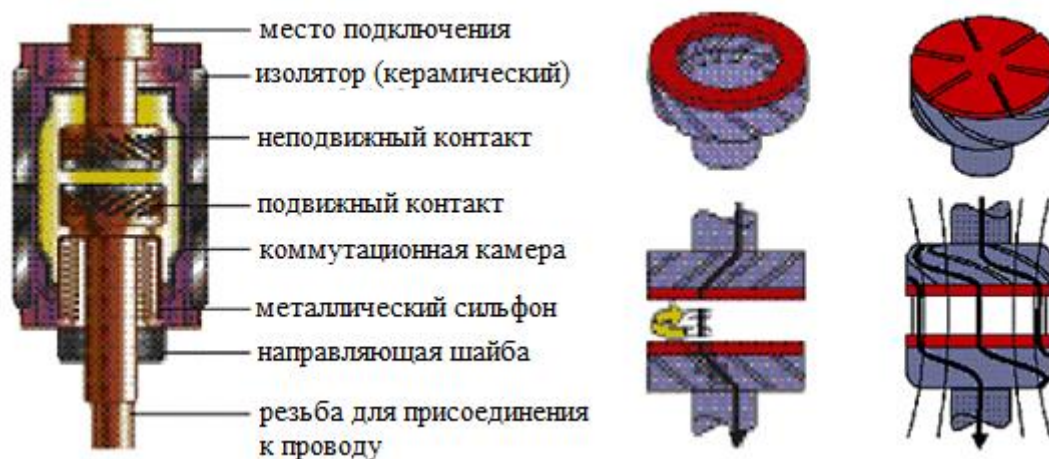


Рисунок 2.3 –Общий вид и конструкция контактной системы камеры АМФ компания Siemens AG

На рисунке 2.4 представлена вакуумная дугогасительная камера (ВДК), разработанная специалистами предприятия «Таврида Электрик».

Корпус ВДК состоит из двух керамических изоляторов 2 и 6 и медного экрана 4, припаяваемого к изоляторам. Конструктивными особенностями ВДК являются чашеобразная форма керамических изоляторов и сварной сиффон 7, значительно снизившие вес и габариты ВДК. Сиффон припаявается к изолятору 6 и выводу 8, обеспечивая возможность перемещения подвижного контакта 5 без нарушения герметичности ВДК.

На торцевые части неподвижного 3 и подвижного 5 контактов припаяны пластины из металлокерамики, обеспечивающие им высокую износостойкость. Выводы 1 и 8 служат для соединения с выводами выключателя.

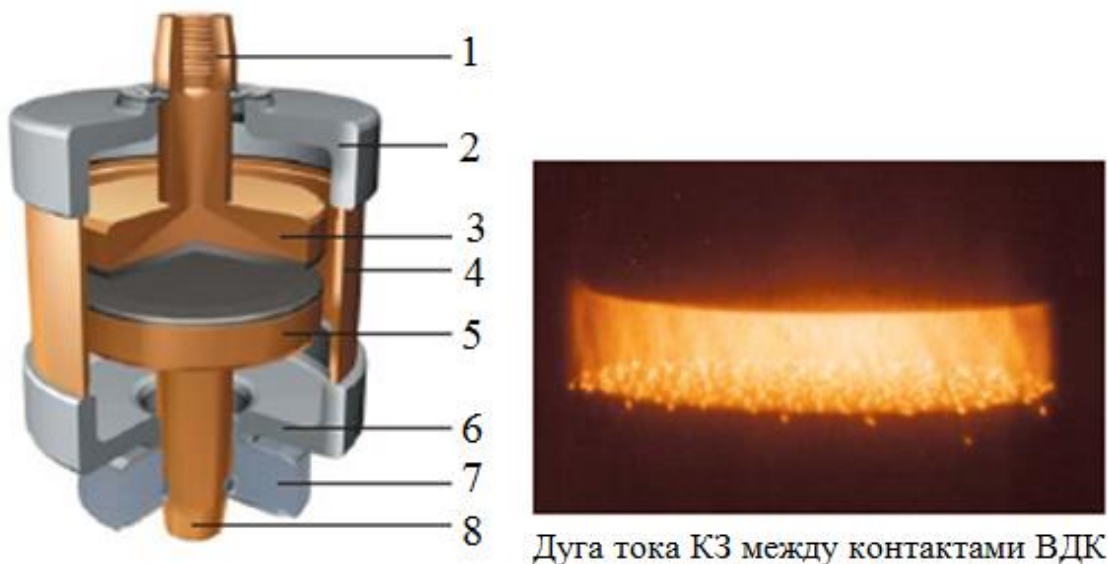


Рисунок 2.4 –Разрез вакуумной камеры серии TEL и дуга тока между контактами

Аксиальное магнитное поле в межконтактном промежутке создается путем выполнения в контактах специальных разрезов (на рисунке не показаны). За счет его дуга не концентрируется, а находится в диффузионном состоянии на всей поверхности контактов, что видно на фотографии. Это значительно снижает износ контактов, повышает отключающую способность и коммутационный ресурс выключателя.

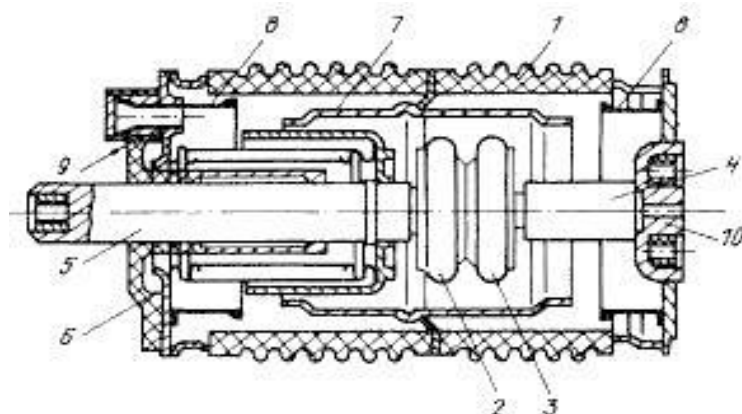
Сегодня ВДК серии TEL имеет самую прогрессивную конструкцию и выпускается предприятиями «Таврида Электрик» с применением последних достижений современных технологий. Она имеет рекордно малые габариты и массу. Износ ее контактов при совершении 50000 операций отключения номинального тока не превышает 1 мм.

Во Всесоюзном электротехническом институте разработаны ВДК трёх классов напряжения 10 кВ, 20 кВ и 35 кВ [2,8]. Схематические разрезы ВДК на напряжение 10 кВ и 35 кВ показаны на рисунках 2.5 и 2.6 соответственно.

Общим в конструкции камер всех типов является следующее.

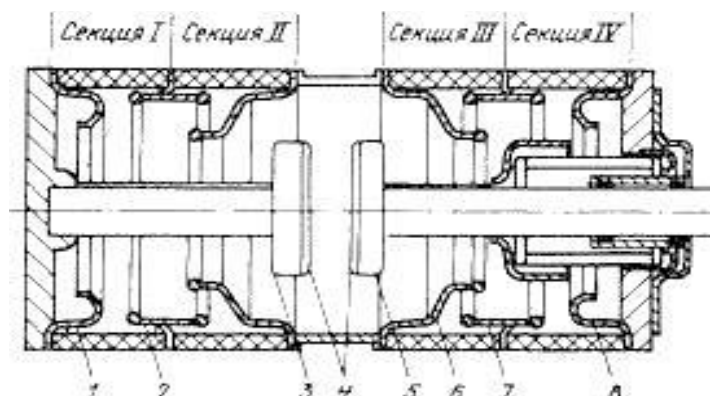
Для изоляции корпуса применяется высокоглиноземистая керамика. Неподвижный вывод выполнен в виде фланца, снабжённого резьбовыми гнёздами, через которые ВДК подключается к токоведущей цепи и закрепляется в выключателе. Контакты окружены центральным медным экраном, который находится под свободным потенциалом.

Сильфон защищён экраном из нержавеющей стали от прожига каплями металла контактов. ВДК снабжены направляющими, закреплёнными снаружи на фланце корпуса со стороны подвижного вывода. Направляющая ограничивает боковое смещение подвижного вывода и задаёт его поступательное движение под действием привода выключателя вдоль оси ВДК.



- 1 - корпус; 2 - подвижный контакт; 3 - неподвижный контакт;  
 4 - неподвижный ввод; 5 - подвижный ввод; 6 - сильфон;  
 7 - центральный экран, находящийся под плавающим потенциалом;  
 8 - торцевые экраны, находящиеся под потенциалами вводов;  
 9 - направляющая; 10 - фланец неподвижного ввода.

Рисунок 2.5 –Схематический разрез камеры на 10 кВ

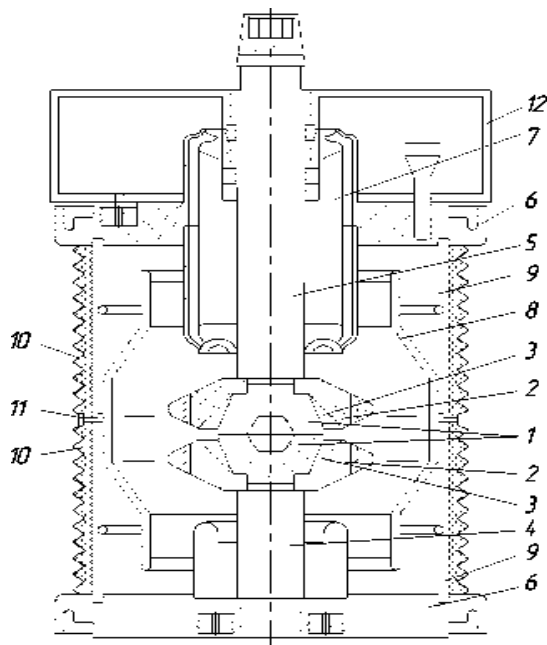


- 1, 8 - торцевые экраны, находящиеся под потенциалами вводов;  
 2, 6, 7 - экраны, находящиеся под плавающим потенциалом;  
 3, 5 - контакты; 4 - контактные накладки из композиции  
 «хром-медь-вольфрам»; I-IV - секции, между которыми распределяется  
 напряжение.

Рисунок 2.6 –Схематический разрез камеры на 35 кВ

На рисунке 2.7 представлено дугогасительное устройство КДВ-10-1600-20. Номинальный ток проходит через торцевые контакты в виде колец. Под действием магнитного поля дуга перебрасывается через зазор 3 на дугогасительные контакты (в виде спиралей) 2 и перемещается по ним с большой скоростью, благодаря чему уменьшается температура опорной точки дуги. Подвод тока к контактам осуществляется с помощью медных стержней

4 и 5. Подвижный контакт крепится к подвижному контакту 6 с помощью сильфона 7 из нержавеющей стали толщиной 0,12 мм для передачи поступательного движения привода на подвижный контакт КДВ. Металлические экраны 8 и 9 служат для защиты керамики 10 от напыления паров металла, образующихся при гашении дуги. Экран 8 крепится к корпусу с помощью кольца 11.



1 - торцевые контакты; 2 - дугогасительные контакты; 3-зазор;  
4, 5-медные стержни для отвода тока к контактам; 6- подвижный контакт; 7- сильфон; 8, 9- металлические экраны; 10- керамика; 11 - кольцо для крепления экрана; 12- направляющий корпус.

Рисунок 2.7 –Вакуумная дугогасительная камера КДВ-10-1600-20

Параметры устройства КДВ-10-1600-20: номинальное напряжение - 10 кВ; номинальный ток - 1660 А; номинальный ток отключения - 20 кА; номинальное относительное содержание апериодической составляющей - 0,35; длительность дуги - не более 0,02 с; предельный ток включения - 51 кА; амплитуда предельного сквозного тока - 70 кА; средний ток среза - не более 10 А; электрическая износостойкость - 10 000 циклов «ВО» при номинальном токе 1600 А и 25 кА при номинальном токе отключения; механическая износостойкость 20 000 циклов «ВО»; допустимый износ контактов - не более 4 мм; средний срок службы камеры 25 лет.

Серийный выпуск камеры КДВ-21 начат в 1968 г. производственным объединением ПО «Полярон», которое принимало участие в её разработке. Она имеет две модификации. У камеры КДВ-21-М вольфрамовые контакты, она применяется в переключающих устройствах РНН трансформаторов. В камере КДВ-21-ХД1 контакты из композиции хром-медь-вольфрам.

Камеры на 10 кВ и отключаемые токи 10 кА, 20 кА и 31,5 кА: КДВХ-10-

10/630, КДВХ-10-20/1600 и КДВХ-10-31,5/1600 представляют собой второе поколение. По сравнению с ВДК первого поколения изменены конструкция и материал ряда деталей. Вместо меди эти детали изготавливаются из железоникелевого сплава и нержавеющей стали. Оптимизирована междуэлектродная геометрия. Оба эти фактора позволили уменьшить массу ВДК второго поколения по сравнению с первым в 2-3 раза, диаметр в 1,1-1,3 раза.

В ВДК второго поколения контакты изготавливаются из композиции «хром-медь-вольфрам» вместо меди и сплава «медь-висмут-бор», использовавшегося в ВДК первого поколения. Более высокая электрическая прочность промежутков с контактами из этого материала позволила уменьшить ход подвижного контакта по сравнению с ВДК первого поколения в среднем на 30%.

Благодаря этому, а также более высокой электроэрозионной стойкости этой композиции коммутационный и механический ресурс второго поколения ВДК по сравнению с первым был увеличен в 1,5-2,5 раза.

Корпус ВДК второго поколения состоит из двух изоляторов, наружная поверхность которых снабжена рёбрами для увеличения электрической прочности в условиях выпадения росы.

Камеры с током отключения 40 кА КДВХ-10-40/1600 и КДВХ-10-40/3150 имеют конструкцию, аналогичную второму поколению ВДК. Для корпуса этих ВДК использованы изоляторы, применявшиеся в ВДК первого поколения с током отключения 31,5 кА. Наружная поверхность этих изоляторов гладкая, необходимая электрическая прочность в условиях выпадения росы достигается за счёт большей длины изоляторов. В КДВХ-10-40/1600 так же, как и в ВДК второго поколения, для материала контактов применяется композиция хром-медь-вольфрам, в КДВ-10-40/3150 контакты состоят из двух материалов: контактирующая часть - из сплава «медь-висмут-бор», дугогасящая - из меди. Использование сплава «медь-висмут-бор» позволило уменьшить электрическое сопротивление камеры в 2-3 раза.

В отличие от ВДК других типов КДВ-10-40/3150 имеет на подвижном выводе контактную насадку, к наружной поверхности которой припаяна серебряная фольга. Контактная насадка служит для присоединения подвижного вывода ВДК к токоведущей цепи выключателя с помощью розеточного контакта, который скользит по серебряной фольге насадки. Присоединение подвижного вывода к токоведущей цепи выключателя осуществляется с помощью гибкой связи и наконечника соответствующей конструкции. Серийное производство ВДК на 10 кВ, 40 кА освоено на МЗВВ. На базе этих ВДК разработаны и прошли испытания несколько типов вакуумных выключателей.

В описанных ВДК с током отключения 10 кА - 40 кА применяются контактные системы спиральной конструкции с поперечным по отношению к току дуги магнитным полем.

В классе 35 кВ разработано пять типов ВДК.

Три из них имеют номинальный ток отключения 20 кА и номинальный ток 1250 А и различаются исполнением наружной изоляции, два других типа имеют номинальный ток отключения 31,5 кА, номинальные токи 1600 А и 2500 А.

Корпус ВДК на 35 кВ состоит из четырёх изоляторов, в середине корпуса находится медный цилиндр, выполняющий одновременно функции центрального экрана. ВДК имеют контактную систему, образующую продольное магнитное поле. Материал контактов - композиция «хром-медь-вольфрам». Экранная система содержит пять экранов, из которых три изолированы от вводов и находятся под плавающим потенциалом. Два экрана расположены у торцов корпуса и имеют потенциалы вводов. Таким образом, внутри корпуса вне контактной системы напряжение распределяется не между двумя промежутками, как в ВДК на 10 кВ и 20 кВ, а между четырьмя. Это значительно снижает вероятность пробоя внутри ВДК по длинным путям, в обход межконтактного промежутка.

ВДК на 35 кВ используются в выключателях на 35 кВ и 110 кВ. В последнем случае несколько камер включаются последовательно. Эти выключатели разработаны и серийно выпускаются НПО «Уралэлектротяжмаш».

История создания ВДК на высокие классы напряжения 110 кВ и выше насчитывает в мире уже немало лет. Такие страны, как Россия, Германия, Франция, Великобритания, США, Китай, активно проводят исследования по созданию вакуумных выключателей на высокие напряжения и большие отключаемые токи.

Особенности формы дуги в вакууме при высоких напряжениях затрудняет ее гашение при переходе через нуль. Другая проблема связана с нелинейной зависимостью напряжения пробоя от междуполусного расстояния. Как одно из решений - несколько соединенных последовательно разрывов или увеличение расстояния между контактами, как это показано на рисунке 2.8 [9,10].

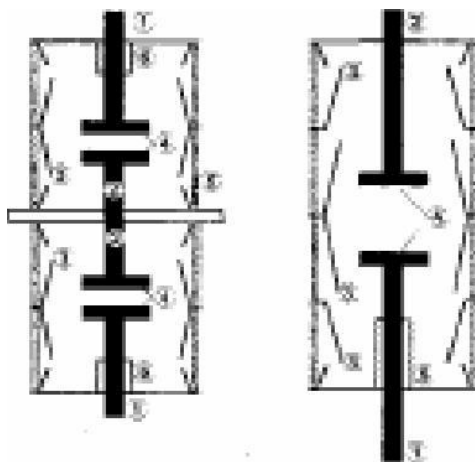


Рисунок 2.8 – Две последовательно включенные дугогасительные камеры и одна с большим междуполусным расстоянием

Другим аспектом, который необходимо принять во внимание, является оплавление и эрозия контактов, чем выше напряжение, тем выше их эрозия и оплавление. Материал рабочей поверхности контактов вакуумного выключателя - существенный фактор в этом вопросе. В результате исследований различных типов комбинаций материалов для вакуумных электродов, были выделены Cu, Cu-Bi и Cu-Cr, бескислородный медный сплав хрома, но Cu-Cr, кажется, лучший до сих пор.

В этом сплаве хром распределен в меди в виде мелких зерен. Этот материал сочетает в себе хорошие дугогасительные характеристики с небольшим риском приваривания контактов (рисунок. 2.9).

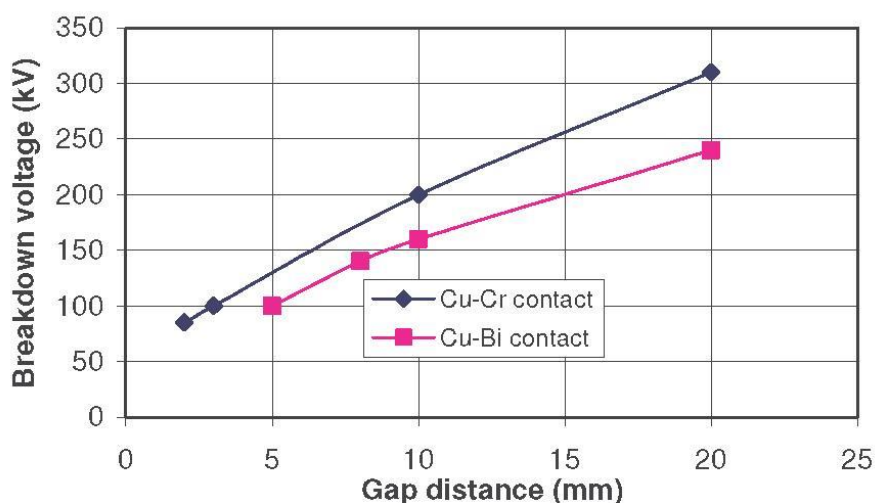


Рисунок 2.9 –Напряжение пробоя Cu-Cr и Cu-Bi между контактами в зависимости от расстояния

Наиболее существенные результаты были получены в Японии. В последние годы на внутреннем рынке Японии появились ВДК на напряжение 145 кВ (рисунок. 2.10) длиной 700 мм, диаметром 200 мм, с контактами Cu-Cr, с аксиальным магнитным полем, и даже фарфоровая сдвоенная ВДК на напряжение 168 кВ.

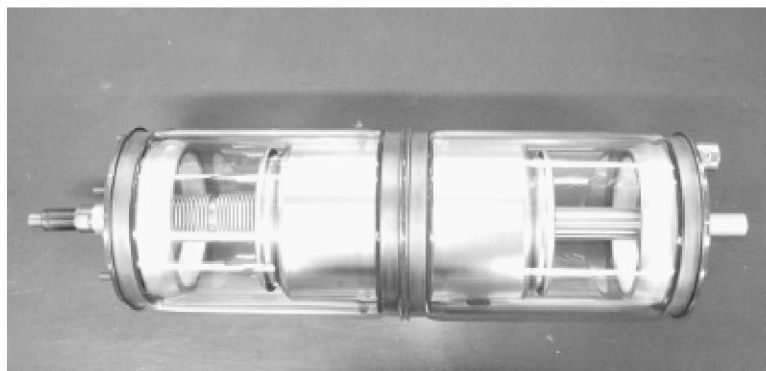


Рисунок 2.10 –Вакуумная дугогасительная камера на 145 кВ японской компании AE PowerSystem Corporation

В настоящее время в Японии одним из главных направлений стало применение ВДК не только в диапазоне средних значений напряжения, но также и в высоковольтных распределительных устройствах подстанций, что обусловлено такими уникальными свойствами ВДК, как высокая отключающая способность, долговечность, безопасность и экономичность.

Также в Японии прослеживается тенденция совмещения высокоскоростных ВДК с технологией сверхпроводимости. Ведутся активно исследования по проблеме применения сверхпроводящих материалов в конструкциях ВДК. Выяснилось, что такое нововведение подошло бы для устройств ограничения тока в мощных энергетических системах. Целый ряд лабораторных исследований проводится с целью установления принципов работы таких устройств, в которых ограничитель тока подключался бы к элементу с высокотемпературной сверхпроводимостью параллельно цепи мощного источника энергии. Когда сверхпроводящий элемент начинает гасить ток в результате перегрузки, ВДК легко размыкает цепь и направляет весь ток в ограничитель тока, что приводит к сохранности сверхпроводящего материала и сокращению его размеров.

В 2003 году был создан вакуумный высоковольтный выключатель с одинарным разрывом цепи напряжением 126 кВ / 40 кА / 2 кА (рисунок 2.11). Прерыватель был диаметром в 100 мм, а необходимый зазор между разомкнутыми контактами составлял 60 мм. Зазор был больше, чем в предыдущих моделях, но, на самом деле, понадобился всего лишь один разрыв.



Рисунок 2.11 –Вакуумные дугогасительные камеры напряжением 252 кВ, 126 кВ и 12 кВ

Фирмой «Вестингауз» изготовлены и всесторонне испытаны вакуумные камеры для напряжения 72 кВ и отключаемого тока 63 кА. Они рассчитаны на номинальный ток 3000 А. Камеры имеют диаметр 23 и длину 46 см. При последовательном включении нескольких таких камер могут быть построены вакуумные выключатели для сетей любых высоких напряжений.

На рисунке 2.12 показаны продольный разрез вакуумной камеры японской фирмы Toshiba и детали контактной системы. Как видно из рисунка, ток  $i$  входит в камеру по контактному стержню 1 и разделяется на четыре части - токи  $i_1, i_2, i_3, i_4$ , направленные сначала радиально, а потом по кольцевым элементам 2.

Пройдя одну четверть окружности, эти токи опять направляются по радиусам другой половины электрода и сходятся в середине электрода. В результате образуется продольный магнитный поток, пропорциональный одной четверти отключаемого тока, проходящего по кольцевым элементам контактной системы. То же самое имеет место на другом контакте [11].

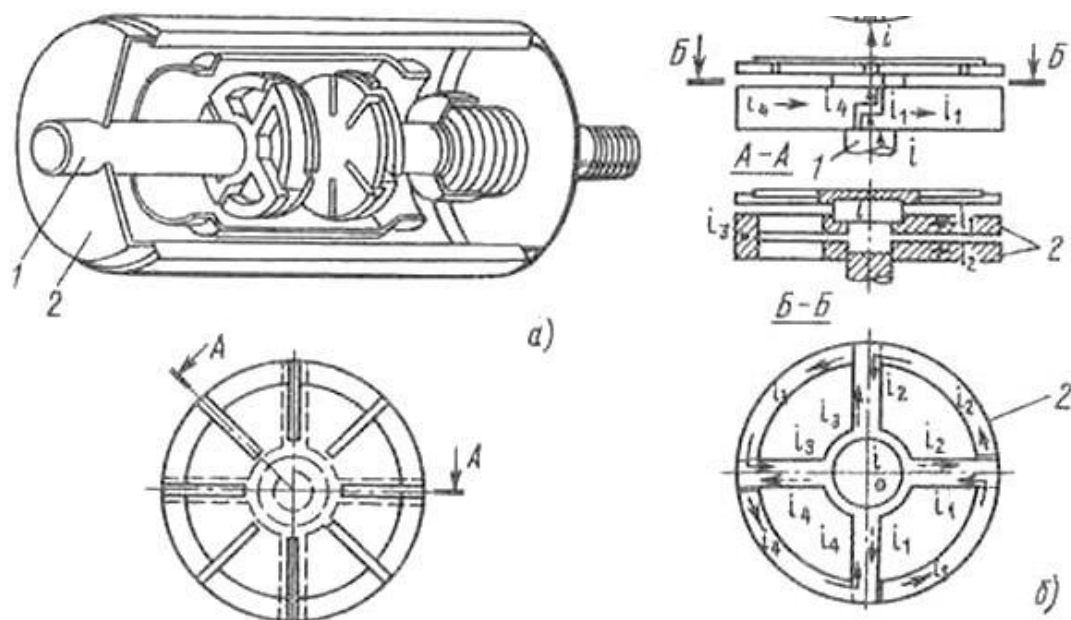


Рисунок 2.12 –Продольный разрез вакуумной камеры и детали контактной системы фирмы Toshiba

В части разработки и внедрения вакуумных выключателей на напряжение 110 кВ - 220 кВ Россия идет в ногу со своими японскими коллегами и значительно опережает европейских ученых и инженеров. В 2008 г. ФГУП ВЭИ (г. Москва) успешно провел испытания опытных образцов российских ВДК типов КДВ-60-31,5/2000 и КДВ-126-40/3150, рассчитанных соответственно на напряжение 60 кВ и 126 кВ переменного тока частотой 50 Гц и предназначенных для комплектации двухразрывных и одnorазрывных вакуумных выключателей 110 кВ - 220 кВ.

Представленная на рисунке 2.13, а камера КДВА-60-31,5/2000 рассчитана на номинальное напряжение 60 кВ, 50 Гц и предназначена для двухразрывного вакуумного выключателя на напряжение 110 кВ (наибольшее рабочее напряжение 126 кВ), номинальный ток отключения 31,5 кА и номинальный ток 2000 А.



*а*



*б*

*а*-вакуумная дугогасительная камера типа КДВА-60-31,5/2000;  
*б*- вакуумная дугогасительная камера типа КДВ-126-40/3150.

Рисунок 2.13– Вакуумные дугогасительные камеры типа КДВ

Камера следующего поколения - КДВ-126-40/3150, представленная на рисунке 2.13, б , используется для комплектации одноразрывного вакуумного выключателя на напряжение 110 кВ, 50 Гц, на номинальный ток 3150 А и номинальный ток отключения 40 кА.

Кроме того, в перспективе на ее основе может быть создан двухразрывный вакуумный выключатель на напряжение 220 кВ.

### 3. Вакуумные выключатели среднего напряжения до 35 кВ

#### 3.1. Общие сведения

В последнее десятилетие в области разработки и производства высоковольтных вакуумных выключателей дальнем зарубежье и в России успешно работают большое количество компаний и предприятий.

Это АВВ, Siemens, Alstom (Areva), SchneiderElectric «Самарский электроцит» СЭЩ (Самара), ФГУП «НПП «Контакт» (Саратов), ВЭИ (Москва), ОАО «Электрокомплекс» & ОАО «Энергетика и экология» (Минусинск), (ООО «НТЭАЗЭлектрик», «Нижнетуринский электроаппаратный завод» (Нижняя Тура), «Электроаппарат» (Уфа), РЗВА «Высоковольтный Союз» (Ровно), НПП «Элвест» (Верхняя Тура) и другие.

Вакуумные выключатели сегодня являются основным типом коммутационного аппарата в сетях среднего класса напряжения 6–35 кВ, чему способствуют их конструктивные и эксплуатационные преимущества.

Конструктивные преимущества вакуумных выключателей – это высокое быстродействие и отключение тока при первом переходе его через нуль после разведения контактов; высокая скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в вакууме после погасания дуги; высокий коммутационный и механический ресурс, определяемый высокой износостойкостью контактов при коммутации номинальных токов и токов короткого замыкания; взрыво- и пожаробезопасность, даже при работе в агрессивных средах; широкий диапазон рабочих температур; повышенная стойкость к ударным и вибрационным нагрузкам; малые габариты и масса дают преимущество при выполнении монтажа; возможность произвольного пространственного расположения ВДК без ухудшения качественных параметров выключателя, что создает дополнительные удобства при монтаже.

К эксплуатационным преимуществам относятся: высокая надежность; меньшая интенсивность отказов; меньшая длительность ремонтов; бесшумность; отсутствие выбросов продуктов горения дуги и внешних эффектов при отключении токов короткого замыкания; отсутствие загрязнения окружающей среды; сокращение перерывов в электроснабжении, связанные с выполнением регламентных работ; отсутствие необходимости в проведении текущего, среднего и капитального ремонта; низкие эксплуатационные затраты, связанные с отсутствием необходимости содержания масляного и компрессорного хозяйств.

Кроме того, вакуумные дугогасительные камеры не требуют пополнения дугогасящей среды; имеют малое потребление мощности по цепи оперативного питания и совместимость с любыми существующими типами ячеек КРУ и КСО.

Следует отметить, что если предприятий, которые производят вакуумные дугогасительные камеры в мире не больше десяти, то предприятий, производящих вакуумные выключатели на базе этих камер в

несколько раз больше. Предприятий, использующих готовые вакуумные выключатели для комплектации ячеек КРУ и комплектных трансформаторных подстанций еще больше, не говоря уже о разных фирмах и дилерских организациях, занимающихся продажей и поставкой чужих выключателей и комплектных КРУ.

В то же время найти подробные описания конструкции и особенностей того или иного включателя крайне сложно. В основном это коммерческие предложения и рекламные материалы, которые не позволяют оценить достоинства и недостатки того или иного аппарата, выбор которого зависит от многих факторов, начиная от личных привязанностей и кончая ценой.

Настоящая работа тоже не ставит перед собой такой цели и может рассматриваться как попытка оценки современного состояния и дальнейших перспектив в разработке и использования вакуумных аппаратов.

### **3.2. Вакуумные выключатели компании Siemens**

Лидерство в разработке и производству вакуумного коммутационного оборудования принадлежит компании Siemens.

На рисунке 3.1 представлена вакуумная техника фирмы Siemens, которая перекрывает весь диапазон требований, предъявляемых к силовым коммутационным аппаратам классов напряжением от 6 кВ до 35 кВ [12].

Основные принципы этого оборудования были заложены несколько десятилетий назад при фундаментальных исследованиях, позволивших специалистам фирмы Siemens создать мощную вакуумную дугогасительную камеру, и на ее базе, в начале 70-х годов, первые серийные вакуумные выключатели типов 3AF и 3AG.

Усовершенствованная специальная геометрия дугогасительных контактов, собственная рецептура и технология изготовления контактных материалов, а также большой опыт, накопленный при изготовлении и эксплуатации около 300 ООО выключателей, легли в основу создания новой серии выключателей 3АН.

Это пять выключателей для всех видов коммутаций:

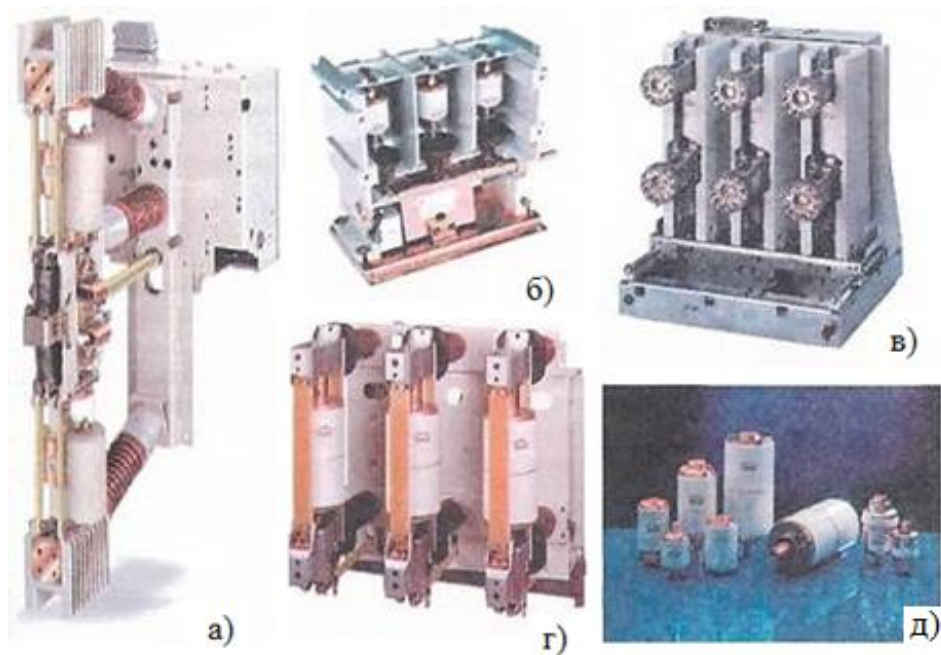
3АН1 - стандартный выключатель на 10.000 циклов, не требующий технического обслуживания;

3АН2 - выключатель с повышенным коммутационным ресурсом на 60.000 циклов;

3АН3 - стандартный выключатель большой мощности на 10.000 циклов;

3АН4 - выключатель с очень высоким коммутационным ресурсом на 120.000 циклов;

3АН5 – выключатель с улучшенной экономичностью на 10.000 циклов.



а) однополюсный вакуумный выключатель тягового электрооборудования; б) вакуумный контактор 3TL; в) вакуумный коммутационный модуль NXACT; г) вакуумный выключатель 3AH; д) вакуумные дугогасительные камеры фирмы Siemens.

Рисунок 3.1 – Вакуумная коммутационная техника фирмы Siemens

Основные характеристики вакуумных выключателей и области их применения приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Типы вакуумных выключателей и их основные характеристики

36 кВ		■					☒	☒			
24 кВ		■ □		□		☒ □		☒ ☒			
17,5 кВ			□		■	☒ □		☒ □	☒	80 кА ☒	
15 кВ			□			☒ □		☒ □	☒	☒	
12 кВ	■	■	■ □		■	☒ □		☒ □	☒	☒	
7,2 кВ			□			☒ □		☒ □	☒	72 кА ☒	
	13,1 кА	16 кА	20 кА		25 кА		31,5 кА	40 кА	50 кА	63 кА	
	800А	800А-1250А	800А-1250А	800А-2500А	800А-1250А	800А-2500А	1250А-2500А	2500А	1250А-3150А	1250А-3150А	1250А-12000А
Обозначения:											
3 AH1 □		3 AH2 ☒		3 AH3 ☒			3 AH4 ☒		3 AH5 ■		

Таблица 3.2 – Область применения выключателей 3АН

Коммутируемое оборудование	Количество коммутации	Номинальное напряжение/ Номинальный отключаемый ток КЗ	Тип выключателя
Воздушные линии	≤10 000	≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤25 кА	3 АН1
Кабели		≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤40 кА	3 АН3
Трансформаторы		12 кВ / ≤25 кА; 17,5 кВ / ≤25 кА 24 кВ / ≤15 кА; 36 кВ / ≤15 кА	3 АН5
Генераторы	≤10 000	≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤25 кА	3 АН1
		≤17,5 кВ / ≤63 кА 24 кВ / 40 кА 36 кВ / ≤40 кА	3 АН3
		17,5 кВ / 50 до 60 кА	3 АН3 63
Конденсаторы	≤10 000	≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤25 кА	3 АН1
		≤17,5 кВ / 50 и 63 кА 24 кВ / 40 кА 36 кВ / ≤40 кА	3 АН3
		12 кВ / ≤25 кА 17,5 кВ / 25 кА 24 кВ / 16 кА 36 кВ / 16 кА	3 АН5
Цепи фильтров	≤10 000	≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤25 кА	3 АН2
		24 кВ / 40 кА 36 кВ / ≤40 кА	3 АН4
Электромоторы	≤10 000	≤15 кВ / ≤40 кА	3АН1
		≤15 кВ / 50 и 63 кА	3 АН3
		≤12 кВ / ≤25 кА	3 АН5
	>10 000	≤15 кВ / ≤40 кА	3 АН2
Компенсационные Реакторы	≤10 000	≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤25 кА	3 АН1
		≤17,5 кВ / 50 и 63 кА 24 кВ / 40 кА 36 кВ / ≤40 кА	3АН3
	>10 000	≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤25 кА	3 АН2
		24 кВ / 40 кА 36 кВ / ≤40 кА	3 АН4
Электродуговые печи	≤60 000	≤17,5 кВ / ≤40 кА 24 кВ / ≤25 кА	3 АН2
	≤120 000	24 кВ / 40 кА 36 кВ / ≤40 кА	3 АН4
Железная дорога 16 <sub>2/3</sub> Гц	≤60 000	17,5 кВ / ≤31,5 кА	3 АН4 7
	≤10 000	17,5 кВ / 40 и 50 кА	3 АН4 7
Железная дорога 50/60 Гц	≤60 000	27,5 кВ / ≤31,5 кА	3 АН4 7

Все выключатели серии ЗАН обеспечивают высокое быстродействие и возможность синхронизации, автоматическое повторное включение на токи до 31,5 кА, отключение токов короткого замыкания с очень высоким нарастанием крутизны тока, коммутацию воздушных и кабельных линий, коммутацию электродвигателей, коммутацию трансформаторов и реакторов, коммутацию конденсаторных батарей, коммутацию цепей электрофильтров и питания электродуговых печей (для этой задачи используется выключатель ЗАН5 с улучшенной экономичностью).

Широкий диапазон коммутируемых мощностей. В классах напряжений от 6 кВ до 35 кВ серия выключателей ЗАН перекрывает весь диапазон отключаемых мощностей. При этом выключатели надежно работают как при длительных перерывах между отключениями, так и в режиме частых коммутаций, что делает их незаменимыми для применения в сетях городского электроснабжения и промышленных предприятий.

Выключатели серии имеют большой срок службы, отличаются повышенной надежностью и не требуют технического обслуживания и ухода в течение всего срока службы. Это обеспечивается использованием подшипников с неизнашиваемыми трущимися поверхностями и применением специальных нестареющих смазочных материалов, а также высоким качеством изготовления.

Выключатели серии ЗАН1, ЗАН3 и наиболее экономичный ЗАН5, даже при частых коммутациях, не требуют никакой настройки их привода, сохраняя технические характеристики в пределах допустимых отклонений. Для выключателей с повышенным коммутационным ресурсом первая смазка привода нужна лишь после 10 тыс. выполненных коммутаций, а необходимость замены вакуумных камер - после 30 тыс.

Базой для создания серии послужил большой опыт производства и эксплуатации предшествующих типов выключателей. Для всех выключателей ЗАН характерен единый принцип конструктивной компоновки и минимальные габариты, обеспечиваемые компактностью конструкции. При создании выключателей использовано минимально возможное количество полимерных материалов, что облегчает их утилизацию по истечении срока службы. Выключатели имеют высокую стойкость к воздействиям окружающей среды и полностью безопасны в эксплуатации.

На рисунке 3.2 представлен вакуумный коммутационный модуль со свойствами выключателя, разъединителя и заземлителя NXACT. Этот коммутационный модуль объединяет все наивысшие достижения современной вакуумной коммутационной техники с расширенными возможностями разъединителя и заземлителя с соответствующей системой механических и электрических блокировок. Для производителей КРУ это обозначает минимум затрат в производстве.

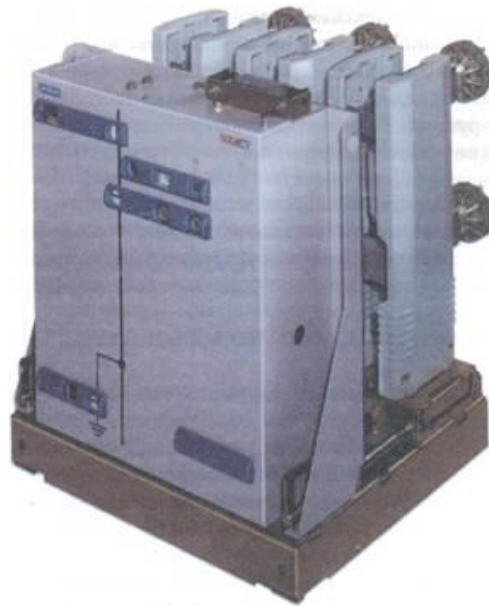


Рисунок 3.2 – Вакуумный коммутационный модуль NXAST

На рисунке 3.3 показан общий вид выключателя Sion 3AE5 компании Siemens, самого компактного вакуумного выключателя для коммутации среднего напряжения до 12 кВ с воздушной изоляцией [13,14,15,16,17]. Объем Sion 3AE5 на 30 процентов меньше, чем у его предшественников.



Рисунок 3.3 – Вакуумный выключатель Sion 3AE5

Чтобы добиться максимального уменьшения размеров вакуумного выключателя Sion 3AE5, компания Siemens прибегла к самым современным

технологиям. Для всех уровней напряжения используются одинаковые размеры: 540 мм в высоту, 447 мм в ширину и 390 мм в глубину.

Вакуумные силовые выключатели SION подходят для использования во всех серийно выпускаемых новых КРУЭ среднего напряжения с воздушной изоляцией, а также для модернизации имеющихся КРУЭ. Они используются, например, для коммутации воздушных ЛЭП, кабелей, трансформаторов, конденсаторов и двигателей. Обширный перечень принадлежностей обеспечивает легкую интеграцию в ячейку и реализуется в максимальной комплектации такой, как выключатель в кассете с заземлителем, что почти полностью укомплектовывает отсек выключателя в ячейке.

Трехфазные силовые выключатели серии ЗАН благодаря универсальной конструкции могут применяться во всех типах распределительных устройств внутренней установки, выпускаемых АО SIEMENS для классов напряжений от 6 кВ до 35 кВ, а также в распределительных устройствах производства других стран, в том числе и в Казахстане.

Так, например, ТОО Астанинский Электротехнический завод) производит высоковольтные ячейки типа КСО-2-10, КСО-292 с вакуумными выключателями ЗАН5 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Общий вид вакуумного выключателя ЗАН5

### **3.3 Вакуумные выключатели ОАО «Самарский трансформатор»**

В России производство вакуумных выключателей осуществляется как на основе вакуумных камер компании Siemens [7], так и основе дугасительных камер собственного производства описанных в разделе 2.

Предприятие ОАО «Самарский трансформатор» (г. Самара) совместно с компанией Siemens AG. выпускает вакуумные выключатели ЗАН5 с АМГ

камерами, которые на сегодняшний день является самым экономичным способом гашения дуги (рисунок 3.5) [7]. В этой камере, кратко описанной в разделе 1.3, при изготовлении контактов использован сплав Cu-Cr, на порядок превосходящий другие контактные материалы и пригодный почти для всех коммутационных задач.



Рисунок 3.5 – Внешний вид выключателя ВВСТ

Мощная вакуумная дугогасящая камера (ВДК) и моторно-пружинный привод выключателя ВВСТ обеспечивают до 30000 коммутационных циклов В-О без какого-либо технического обслуживания.

Аппараты рассчитаны на длительный срок службы и обладают повышенной безопасностью и надежностью. Компактность выключателя позволяет значительно уменьшить габариты ячеек КРУ и КСО.

Преимуществами ВВСТ являются стабильность диэлектрической среды дугогасящей камеры на протяжении всего срока службы выключателя, постоянство переходного сопротивления контактов, отсутствие продуктов разложения при коммутациях, высокое число коммутаций и отсутствие обслуживания в течение 20 лет. На российский рынок эти выключатели вышли под маркой ВВСТ.

#### **3.4 Вакуумные выключатели ОАО «ЭЛКО» (г. Минусинск)**

ОАО «ЭЛКО» (г. Минусинск) является крупнейшим в России производителем вакуумных выключателей на класс напряжения до 10 кВ и серийно выпускает вакуумные выключатели с 1981 г.

Выключатели предназначены для коммутации электрических цепей при нормальных и аварийных режимах в сетях трёхфазного переменного тока с изолированной нейтралью частотой 50 Гц (60 Гц), номинальным напряжением до 12 кВ, номинальными токами от 630 А до 3150 А и токами отключения от 5 кА до 40 кА.

Механический и коммутационный ресурс при номинальном токе - до 50

000 операций отключения. Коммутационный ресурс при токах короткого замыкания - до 100 операций отключения без обслуживания и замены дугогасительных камер.

Выключатели изготавливаются со встроенными электромагнитными или пружинно-моторными приводами со схемами управления на постоянном или переменном токе и могут применяться в различных климатических условиях с температурой окружающей среды от -60 °С до +50 °С и относительной влажностью воздуха до 100% при +25°С.

Выключатели ВВЭ-М-10-20 и ВВП-М-10-20 предназначены для установки в КРУ типа К-104, КМ-1Ф, К-49, К-59.

Выключатели ВВТЭ-М-10-20 и ВВТП-М-10-20 для установки КРУ типа КРУЭ-6П, 2КВЭ-6М, КРУП-6П, а также для замены малообъемных выключателей типа ВМПЭ-10, ВМП-10К, ВМГ-133 в любых типах распределительных устройств К-III, К-IIIУ, К-ХII, К-ХIII, КРУ-2В, К-ХХУI, К-37, КР-2-10, КВ-2-10, КСО-2-УМ, КСО-237, К-266, КСО-285, КРУ производства стран СНГ.

В выключателях применяется вакуумные дугогасительные камеры КДВ2-10-5/400 УХЛ2 для вакуумных контакторов переменного тока высокого напряжения, КДВХ-10-10/630 УХЛ2 для вакуумных выключателей напряжения 10 кВ и 11 кВ, и КДВ35-25/1600 УХЛ2, для комплектации вакуумных выключателей напряжения 35 кВ.

Технические характеристики вакуумных дугогасительных камер приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Вакуумные дугогасительные камеры

Параметры	КДВ2-10-5/400	КДВХ-10-10/630	КДВ-35-25/1600
Номинальное напряжение, кВ	10	10	35
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12	12	40,5
Номинальный ток, А	400	630	1600
Номинальный ток отключения, кА	5	10	20
Коммутационная износостойкость, цикл: при номинальном токе	750 000	50 000	20 000
При номинальном токе отключения	50	100	100
Механический ресурс, циклы «ВО»	750 000	50 000	50 000
Длина, мм, не более	185	222	410
Диаметр, мм	75	102	150
Масса, кг	1,7	2,9	11

На рисунке 3.6 показан общий вид одного из типов выключателя ВВЭ-М-10-40, предназначенного для установки в КРУ типа К-105, К-59, производства Минусинского ОАО «ЭЛКО».

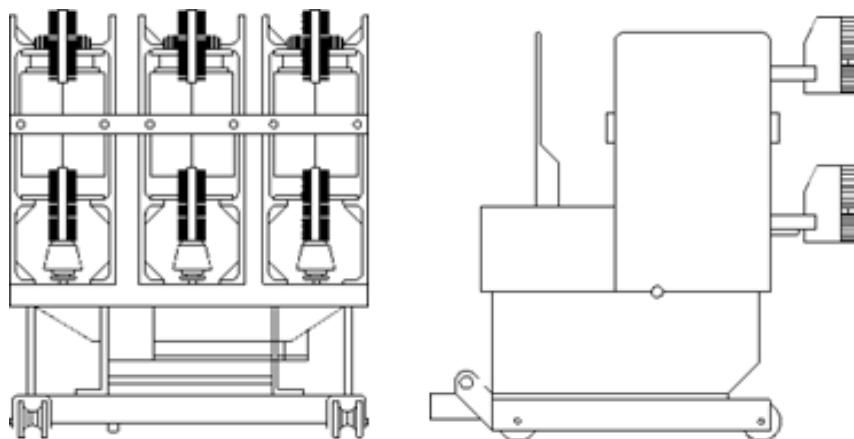


Рисунок 3.6 – Общий вид выключателей ВВЭ-М-10-40

Кроме этого, в ОАО «ЭЛКО» разработан новый малогабаритный вакуумный выключатель ВБСК-10-20/630 - 1000. Он предназначен для использования в комплектных устройствах серии К-112, выпускаемых московским заводом «Электроцит» для пунктов автоматического секционирования с односторонним и двусторонним питанием, для включения резерва и плавки гололёда.

Существенное отличие ВБСК-10 от других вакуумных выключателей с электромагнитным приводом в том, что он, дополнительно к электромагнитному, снабжён пружинным приводом с ручным взводом пружин, что обеспечивает возможность оперативного включения при отсутствии питания вторичных цепей.

### 3.5 Выключатели Государственного НПП «Контакт» (г. Саратов)

Государственное научно-производственное предприятие «Контакт» освоило совместно с ВЭИ гамму вакуумных дугогасительных камер на номинальное напряжение от 1,14 кВ до 35 кВ (КДВХ4-10-20/1600 УХЛ2, КДВ3-10-5/400 УХЛ2, КДВ2-35-25/1600 УХЛ2, КДВ2-10-40/3150 УХЛ2, КДВА2-10-31,5/1600<sup>^</sup>2500 УХЛ2, КДВА2-10-12,5/800 УХЛ2, КДВ-35-40/2000 УХЛ2, КДВА-1,14-20/1000 УХЛ2, КДВ2-1,14-2,5/250 В3) с номинальными рабочими токами до 3150 А и токами короткого замыкания до 40 кА.

На сегодняшний день более 100 тыс. вакуумных дугогасительных камер безотказно работают во многих странах мира на вакуумной коммутационной аппаратуре различных заводов изготовителей.

На основе дугогасительных камер собственного производства предприятие освоило целый ряд вакуумных коммутационных аппаратов:

- вакуумный выключатель нагрузки типа ВНБ-10-16/630, который имеет огромный (до 50 тыс.) ресурс механического включения и отключения, малые габариты, исполняется встроенным и в выкатном (на кассете) исполнении. Он имеет механическое и полноприводное выключение с применением электромагнита и при необходимости дополнительно оснащается нужными расцепителями;

- вакуумные выключатели типа ВБЭ-10-31,5/2000 и ВБЭ-10-31,5/3150 в габаритных размерах вакуумного выключателя ВБЭ-10-20/630-1600, имеющие отработанный и надёжный электромагнитный привод, большое количество циклов «включения-отключения», необходимое количество расцепителей (до шести);

- вакуумный выключатель типа ВБ-10-20/630-1600, достоинствами которого являются малый вес и габариты, современный дизайн, порошковая покраска металлических частей, возможность применения различных необслуживаемых приводов с механической защёлкой, позволяющей ручное включение при отсутствии оперативного напряжения и производство оперативного включения выключателя под нагрузкой на тупиковых подстанциях. Большой механический ресурс 150 циклов при токе короткого замыкания 20 кА и 100 000 циклов при номинальном токе, наличие простой необслуживаемой защёлки. Возможность поперечного расположения привода ставит этот выключатель на уровень лучших мировых аналогов, выпускаемых ведущими фирмами, такими, как «АББ», «Siemens», «Шнайдер-Электрик» и др., имея при этом значительно меньшую стоимость;

- вакуумный выключатель типа ВБЭК-35-25(31,5)/630-1600 в выкатном исполнении, не содержащий масла (сухой), климатического исполнения УХЛ2, с электромагнитным приводом;

- вакуумный выключатель типа ВБЭС-35Ш-25(31,5)/630-1600 УХЛ1 в стационарном исполнении, не содержащий масла (сухой), с электромагнитным приводом.

Ведутся работы по созданию выключателя на номинальные напряжения 27,5 кВ и 35 кВ с приводом на переменном токе, а также автоматического вакуумного выключателя на номинальное рабочее напряжение до 1,14 кВ, ток короткого замыкания 20 кА и рабочий ток 1000 А с применением электронных устройств защиты.

Вакуумный автоматический выключатель ВВА-1,14 открытого исполнения с естественным воздушным охлаждением предназначен для работы в номинальном режиме, отключения тока при коротких замыканиях, перегрузках и недопустимых снижениях напряжения, а также для нечастого оперативного включения и отключения приёмников электрической энергии. Выключатель имеет небольшими габариты и малую массу и рассчитан на длительный срок службы при минимальных затратах на обслуживание.

В таблице 3.4 приведены основные параметры разрабатываемой и выпускаемой коммутационной аппаратуры НПП «Контакт»

Таблица 3.4 – Основные параметры выпускаемой коммутационной аппаратуры

Тип аппарата	Напряжение, кВ	Ном. ток, А	Ном. ток отключения, кА
ВБТ-10-20/630-1250 УХЛЗ*	10	630 1250	20
ВБЭ-10-20/1600 УХЛ2	10	1600	20
ВБЭМ-10-5/400 У2 УХЛ5	10	400	5
ВБПС-10-20/1600 УХЛ2* *	10	1600	20
ВБЭК-10-40/1600 УХЛ2	10	1600	40
ВБЭК-10-40/3150 УХЛ2	10	3150	40
ВБПК-35-20/1600 УХЛ2	35	1600	20
ВБПС-35-40/2000 УХЛ1	35	2000	40

### 3.6 Вакуумные выключатели ОАО «Таврида электрик»

В конце XX века инновационная конструкция выключателей ВВ/TEL ОАО «Таврида электрик» произвела переворот в мире коммутационной аппаратуры 6-10 кВ и позволила совершить прорыв на пути создания современных КРУ высокой надежности, не требующих обслуживания выключателя на протяжении всего срока службы.

Запатентованная конструкция, легкость и неприхотливость конструкции ВВ/TEL позволяет встроить выключатель в любую существующую ячейку КРУ или КСО, либо создать новую с уникальными потребительскими качествами.

Сегодня выключатели ВВ/TEL применяются на 5-ти континентах мира, чем подтверждает удовлетворение самым жестким требованиям эксплуатации [20].

Отличительной особенностью конструкции вакуумных выключателей серии ВВ/TEL является использование принципа соосности электромагнита привода и вакуумной дугогасительной камеры в каждом полюсе выключателя, которые механически соединены между собой общим валом, и фиксации контактов КВД в замкнутом положении за счёт остаточной индукции приводных электромагнитов («магнитная защёлка»). Кроме этого, для гашения дуги используется оригинальная гасительная камера собственной конструкции и производства, описание которой приведено в разделе 1,2.

Принцип фиксации контактов ВДК в замкнутом положении с применением магнитной защёлки в настоящее время используется в новых конструкциях вакуумных выключателей ряда различных фирм. Оригинальность конструкции выключателей ВВ/TEL позволила достичь следующих преимуществ по сравнению с другими коммутационными

аппаратами:

- высокий механический и коммутационный ресурс;
- малые габариты и вес;
- небольшое потребление энергии по цепям управления;
- возможность управления по цепям постоянного, выпрямленного и переменного оперативного тока;
- простота встраивания в различные типы КРУ и КСО и удобство организации необходимых блокировок;
- отсутствие необходимости ремонта в течение всего срока службы;
- доступная цена.

Благодаря своим преимуществам вакуумные выключатели ВВ/TEL широко применяются во вновь разрабатываемых комплектных распределительных устройствах (КРУ, КСО, КРН), а также для реконструкции ячеек КРУ, находящихся в эксплуатации и имеющих в своём составе на момент реконструкции выключатели других конструкций, которые устарели морально и физически.

Выключатели состоят из трех полюсов, установленных на металлическом корпусе, в котором размещаются электромагнитные приводы каждого полюса с магнитной защелкой, удерживающей выключатель неограниченно долго во включенном положении после прерывания тока в катушке электромагнита привода.

Основные узлы выключателей на ток до 1000 А размещаются в закрытом изоляционном корпусе круглого сечения, выполненном из механически прочного и дугостойкого материала, защищающего элементы полюса от механических повреждений и воздействий электрической дуги тока КЗ.

Общий вид вакуумного выключателя серии ВВ/TEL показан на рисунке 3.7, а на рисунке 3.8 конструкция, разрез и схема устройства полюса выключателя.



Рисунок 3.7 – Общий вид вакуумного выключателя серии ВВ/TEL

Выключатель состоит из трёх полюсов одинаковой конструкции, установленных на общем основании. В состав полюса входят следующие

основные элементы: ВДК 2 с неподвижным 1 и подвижным 3 контактами и сильфоном, гибкий токосъем, тяговый изолятор 5, токоведущие выводы и электромагнитный привод. Привод состоит из кольцевого электромагнита 13, якоря 12, катушки 11, пружин отключения 9 и дополнительного поджатия 10, тяги 15 устройства ручного отключения. Катушки электромагнита включены в цепь управления параллельно и используются для включения и отключения выключателя.

Полюса механически связаны между собой промежуточным валом 8, на котором установлен кулачок для управления вспомогательными контактами, используемыми во внешних цепях (управления, сигнализации и др.).

Привод вакуумного выключателя состоит из электромагнитов (по одному на каждую фазу), соединённых между собой параллельно, и блока управления.

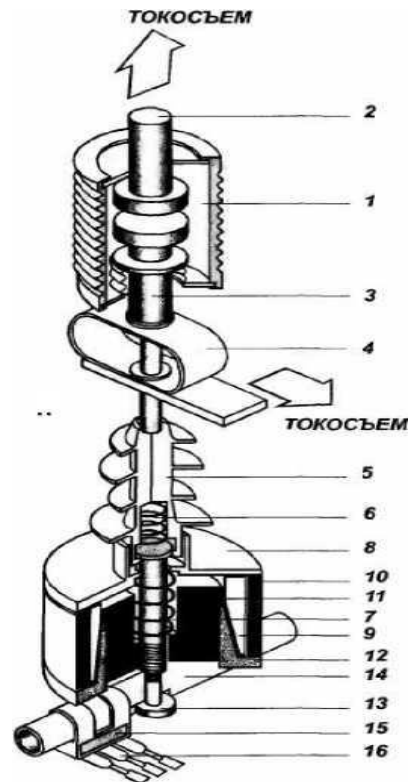
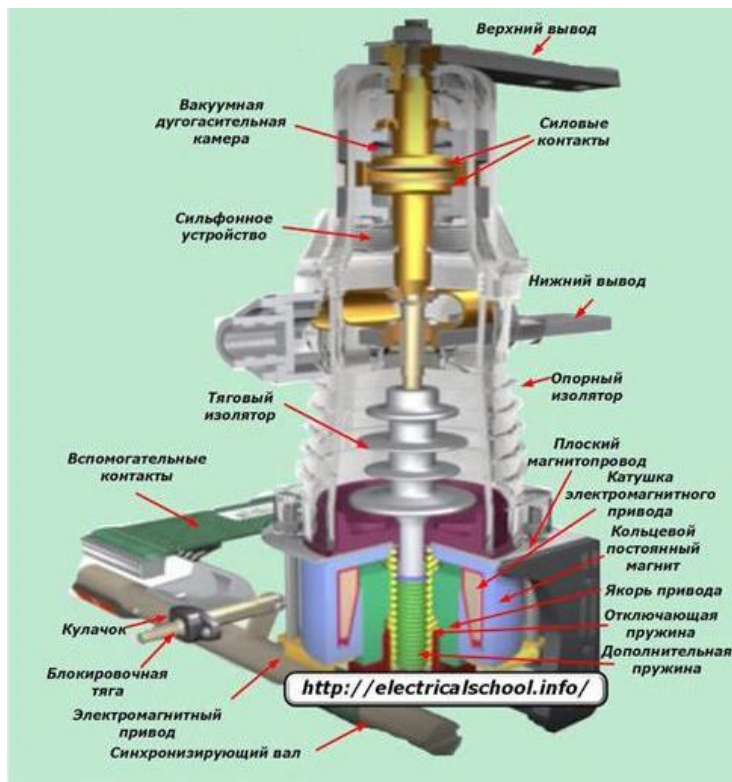
Якоря 11 приводных электромагнитов выключателя соединены между собой общим валом 14, который в процессе включения и отключения поворачивается вокруг своей продольной оси, обеспечивая управление указателем положения выключателя «ВКЛ-ОТКЛ», ручное отключение выключателя при аварийных ситуациях, управление контактами для внешних вспомогательных цепей с помощью постоянного магнита и предотвращение срабатывания выключателя в неполнофазном режиме.

Исходное разомкнутое состояние контактов 1, 3 вакуумной дугогасительной камеры выключателя обеспечивается за счёт воздействия на подвижный контакт 3 отключающей пружины 7 через тяговый изолятор.

При подаче сигнала «ВКЛ» блок управления выключателя формирует импульс напряжения положительной полярности, который прикладывается к обмотке 9 электромагнита. При этом в зазоре магнитной системы появляется электромагнитная сила притяжения, преодолевающая усилие пружин отключения 7 и поджатия 6, в результате чего под действием разницы указанных сил якорь электромагнита 11 вместе с тяговым изолятором 5 и подвижным контактом 3 вакуумной камеры 2 начинает движение в направлении неподвижного контакта 1, сжимая при этом пружину отключения 7.

После замыкания основных контактов якорь электромагнита продолжает двигаться вверх, дополнительно сжимая пружину поджатия 6. Движение якоря продолжается до тех пор, пока рабочий зазор в магнитной системе электромагнита не станет равным нулю.

Кольцевой магнит 10 имеет магнитную энергию, необходимую для удержания выключателя во включённом положении, а катушка 9 начинает обесточиваться, после чего привод оказывается подготовленным к операции отключения. Таким образом, выключатель становится на магнитную защёлку, т.е. энергия управления для удержания контактов 1 и 3 в замкнутом положении не потребляется.



1- неподвижный контакт ВДК; 2- вакуумная дугогасительная камера; 3- подвижный контакт ВДК; 4- гибкий токосъём; 5- тяговый изолятор; 6- пружина поджатия; 7- отключающая пружина; 8- верхняя крышка; 9-обмотка; кольцевой магнит; 11- якорь; 12-нижняя крышка; 13- пластина; 14- вал; 15- постоянный магнит; 16- герконы (контакты для внешних вспомогательных цепей).

Рисунок 3.8 - Схема устройства полюса выключателя ВВ/TEL

В процессе включения выключателя пластина 13, входящая в прорезь вала 14, поворачивает этот вал, перемещая установленный на нём постоянный магнит 15 и обеспечивая срабатывание герконов 16, коммутирующих внешние вспомогательные цепи.

Источником электрической энергии для включения ВВ служат предварительно заряженные малогабаритные конденсаторы, устанавливаемые в БУ (BU) или в блоке питания БП (BP).

При подаче сигнала «ОТКЛ» блок управления формирует импульс тока, который имеет противоположное направление по отношению к току включения и меньшее амплитудное значение. Магнит 10 при этом размагничивается, привод снимается с магнитной защёлки, и под действием энергии, накопленной в пружинах отключения 7 и поджатия якоря 11, перемещается вниз, в процессе движения ударяя по тяговому изолятору 5, связанному с подвижным контактом 3. Контакты 1 и 3 размыкаются, выключатель отключает нагрузку.

Ручное оперативное отключение выключателя осуществляется путём механического воздействия на кнопку ручного отключения, которая в свою очередь через толкатель, шарнирно связанный с валом 14 выключателя, воздействует через этот вал на якоря 11 электромагнитов привода. При этом разрывается магнитная система привода, её магнитная энергия уменьшается, после чего механической энергии пружины отключения 7 оказывается достаточно для размыкания контактов 1 и 3 выключателя. Кнопка ручного отключения одновременно выполняет функцию указателя положения выключателя «ВКЛ-ОТКЛ».

Ручное включение выключателя не предусмотрено. Для первого включения выключателя, когда на подстанции отсутствует питание цепей оперативного тока, разработан способ включения выключателя электрическим путём от автономного источника питания.

Наличие в схеме управления выключателями батареи малогабаритных конденсаторов позволяет осуществлять автономное включение ВВ на обесточенной подстанции с помощью двух стандартных элементов питания 9 В, подключая их низковольтному входу БУ.

Имеющийся в БУ или блоке питания преобразователь повышает напряжение питания до необходимого и заряжает в течение короткого времени (менее 1 мин) батарею конденсаторов, после чего выключатель готов к выполнению операции включения и отключения.

В настоящее время выключатели выпускаются в двух основных конструктивных исполнениях с междуполюсным расстоянием 200 мм. и 250 мм. (рисунок 3.9).

Выключатели конструктивного исполнения с междуполюсным расстоянием 200 мм предназначены преимущественно для замены в ячейках КРУ выключателей типа ВМП-10, ВМПЭ-10, ВМПП-10, ВК-10, ВКЭ-10 и других, а также для применения во вновь разрабатываемых ячейках КРУ.

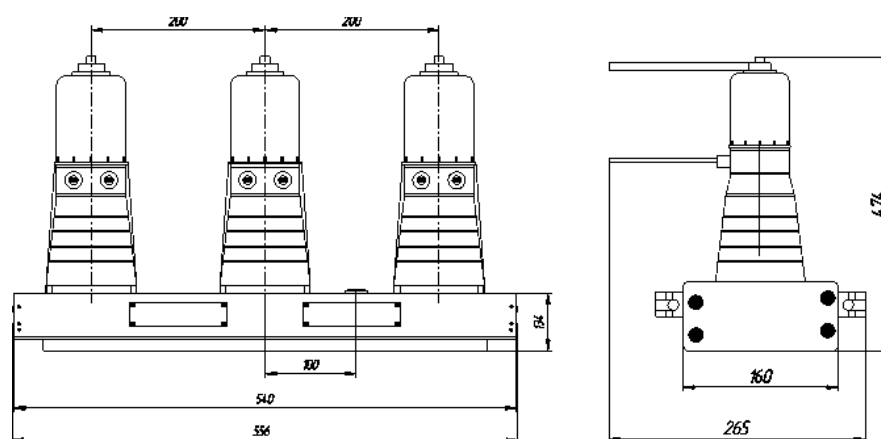


Рисунок 3.9 – Конструктивное исполнение ВВ/TEL с междуполюсным расстоянием 200 мм

Выключатели конструктивного исполнения с междуполюсным расстоянием 250 мм предназначены преимущественно для замены в камерах

КСО и КРН выключателей типа ВМГ-133 и других, а также для применения во вновь разрабатываемых камерах КСО и КРН.

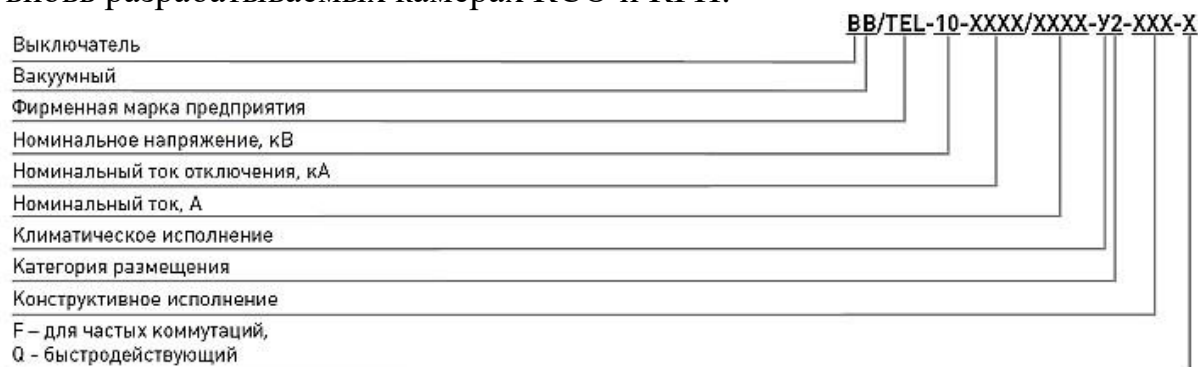


Рисунок 3.10 – Структура условного обозначения выключателей серии TEL

Таблица 3.5 – Технические характеристики выключателей серии ВВ/TEL

Техническая характеристика выключателей серии ВВ/TEL		
Номинальное напряжение, кВ	10	
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12	
Номинальный ток, А	630, 1000	
Номинальный ток отключения, кА	12,5	20
Сквозной ток короткого замыкания, наибольший пик, кА	32	52
Нормированное процентное содержание аperiodической составляющей, %, не более	40	40
Время отключения полное, мс, не более	25	25
Время отключения собственное, мс, не более	15	15
Время включения собственное, мс, не более	70	70
Ресурс по коммутационной стойкости при отключении: номинального тока, операций «ВО»	50 000	50 000
(60 — 100) % от номинального тока отключения, операций	100	100
Ресурс по механической стойкости, операций «ВО»	50 000	50 000
Номинальное напряжение электромагнитов управления, В	220	220
Диапазон напряжений электромагнитов при включении, % от номинального значения	85-110	85-110
Диапазон напряжений электромагнитов при отключении, % от номинального значения	65-120	65-120
Наибольший ток электромагнитов управления при номинальном напряжении, А	10	10
Срок службы до списания, лет	25	25
Масса, кг:		
исполнение с межполюсным расстоянием 200 мм	32	32
исполнение с межполюсным расстоянием 250 мм	35,5	35,5

### **3.7 Вакуумные выключатели производства Концерна «Высоковольтный союз» (Нижнетуринский электроаппаратный завод (ООО «НТЭАЗ Электрик»))**

Концерн «Высоковольтный союз» является одним из крупнейших производителей электротехнического оборудования класса 6–220 кВ в России. Головным предприятием Концерна в России и странах СНГ является Нижнетуринский электроаппаратный завод (ООО «НТЭАЗ Электрик») [22].

Нижнетуринский электроаппаратный завод был основан в 1958 году в городе Нижняя Тура Свердловской области. Вся выпускаемая продукция – собственной разработки, Многие технические решения, признаны новаторскими и защищены авторскими правами.

«НТЭАЗ Электрик» производит современные вакуумные выключатели на напряжения от 6 кВ до 110 кВ, вакуумные генераторные выключатели, современные КРУ 6(10) кВ, 35 кВ и комплектные трансформаторные подстанции 35 кВ – 220 кВ.

Предприятия Концерна одними из первых среди предприятий бывшего Советского Союза еще в 1983 году начали серийное производство вакуумных выключателей. В 1998 году начато серийное производство новых вакуумных выключателей серии ВР на напряжение 6-10 кВ, которые перекрыли практически весь диапазон номинальных токов и токов отключения.

В 2004 году начато серийное производство вакуумных выключателей серии ВРС для распределительных устройств (КРУ) с расположением отсека выдвижного элемента в средней части шкафа.

В 2006 году начато серийное производство вакуумных выключателей наружной установки напряжением 35 кВ с цельнолитыми полюсами из кремнийорганической изоляции.

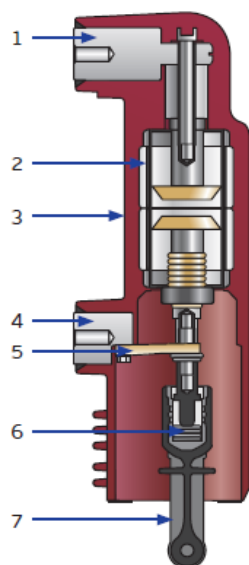
С 2011 года начато серийное производство вакуумных выключателей на напряжение 110 кВ типа ВРС-110 с одним разрывом на фазу. Вакуумные выключатели концерна успешно эксплуатируются в странах СНГ, Азии и Европы.

Конструкция полюса выключателя на напряжение 6 кВ - 10 кВ приведена на рисунке 3.11. Полюса для внутренней установки - литые из эпоксидного компаунда, для наружной установки - цельнолитые из кремнийорганической изоляции.

Залитые эпоксидным компаундом вакуумные камеры надежно защищены от механических и электрических повреждений. Трубообразная конструкция изоляции полюсов обеспечивает оптимальное распределение электрического поля, при которой расстояние между полюсами и от земли минимальны.

Контакты вакуумных камер выполнены из специальных легированных сплавов. Горение дуги поддерживается металлическими парами за счет испарения материала электродов. Электрическая дуга мягко гасится при

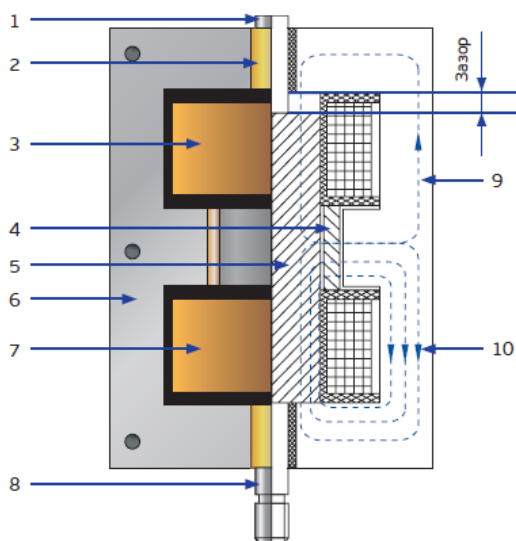
переходе тока через ноль без перенапряжений при коммутациях практически всех видов нагрузок.



- 1 – верхний контакт;
- 2 - вакуумная дугогасительная камера;
- 3 – литой полюс из эпоксидного компаунда;
- 4 – нижний контакт;
- 5 – гибкая связь;
- 6 – пружины поджатия;
- 7 – изолированная тяга.

Рисунок 3.11 – Конструкция полюса выключателя типа ВРС

В выключателях применяется универсальный электромагнитный привод (рисунок 3.12). Для удержания контактов во включенном или отключенном положениях используется энергия мощных постоянных магнитов. Фиксация происходит за счет использования принципа магнитной защелки путем замыкания магнитной цепи включения или отключения якорем, механически связанным с подвижными контактами вакуумных камер. Привод управляется при помощи универсального встроенного или выносного блока управления. Отключение происходит за счет энергии предварительно заряженных конденсаторов.



- 1,8 – шток;
- 2 – призма;
- 3 – катушка отключения;
- 4 – постоянный магнит;
- 5 – якорь;
- 6 – магнитопровод;
- 7 – катушка включения;
- 8 – магнитная цепь отключения;
- 9 – магнитная цепь включения.

Рисунок 3.12 – Конструкция электромагнитного привода.

В выключателях также применяются и пружинные приводы, которые обеспечивают возможность ручного управления.

Выполненные в блоке управления схемные решения позволяют применять выключатели во всех известных типовых работах для схем с пружинными и электромагнитными приводами для всех типов КРУ.

Внешний вид вакуумных выключателей серии ВР и их технические характеристики приведены на рисунке 3.13 и в таблице 3.6.



Рисунок 3.13

Таблица 3.6

Наименование параметра	ВР 1	ВР 2	ВР 3
Номинальное напряжение, кВ	10	10	10
Номинальное рабочее напряжение, кВ	12	12	12
Номинальный ток, А	600, 1000 1200	1600	600, 800, 1000, 1200, 1600, 2000
Номинальный ток отключения, кА	20	20	31,5
Ток термической стойкости, кА	20	20	31,5
Ток электродинамической стойкости, кА	52	52	80
Полное время отключения (не более), мкс	57	65	65
Собственное время включения (не более), мкс	90	90	90
Собственное время отключения (не более), мкс	42	35-50	35-50
Механический ресурс, циклов ВО	100000	100000	100000
Коммутационный ресурс циклов ВО: при номинальных токах; при номинальных токах отключения.	50000 100	30000 40	30000 50, 40
Масса, кг	60	136	96, 136

На рисунке 3.14 и в таблице 3.7 показаны внешний вид и приведены основные технические характеристики вакуумных выключателей типа ВР6, ВР6В, ВР6К, предназначенных для распределительных устройств

собственных нужд тепловых и атомных станций, в основном для замены электромагнитных выключателей ВЭМ.



Рисунок 3.14

Выключатели изготавливаются в сейсмостойком исполнении для работы в помещениях при максимальном расчетном землетрясении 9 баллов по шкале MSK-64 и состоят из трех полюсов с залитыми вакуумными камерами, размещенными на общем основании. Только в выключателях VR68 на номинальные токи 2500 А и 3150 А дугогасительные камеры установлены на изоляционных стойках.

Таблица 3.7

Наименование параметра	VR 6	VR 6B		VR 6K
Номинальное напряжение, кВ	6	6	6	6
Номинальное рабочее напряжение, кВ	7,2	7,2	7,2	7,2
Номинальный ток, А	1600, 2000	1600, 2000	2500, 3150	1600, 2000 3150
Номинальный ток отключения, кА	40	40	40	40
Ток термической стойкости, кА	40	40	40	40
Ток электродинамической стойкости, кА	128	128	128	128
Полное время отключения (не более), мкс	70	70	70	70
Собственное время включения (не более), мкс	120	120	120	120
Собственное время отключения (не более) мкс	30-55	30-55	30-55	30-55
Механический ресурс, циклов ВО	30000	25000	30000	30000
Коммутационный ресурс циклов ВО: при номинальных токах; при номинальных токах отключения.	30000 40	25000 40	30000 50	30000 40-50
Масса, кг	162	287	326	450/710

На рисунке 3.15 показан внешний вид, а в таблице 3.8 приведены основные технические характеристики вакуумных выключателей типа ВРС -6

и ВРС–10, предназначенные в основном для электрических сетей с изолированной и частично заземленной нейтралью.



ВРС-6

ВРС-10

Рисунок 3.15

Выключатели комплектуются электромагнитным приводом и предназначены для работы во вновь устанавливаемых КРУ как собственного производства, так и производства других производителей. Отличительной особенностью выключателя ВРС -6 является увеличение до 128 кВ значение тока электродинамической стойкости.

В зависимости от номинальных параметров серия ВРС насчитывает несколько типов, которые отличаются габаритными размерами рамы и параметрами вакуумных камер, имеющих расстояния между контактного промежутка 275 мм и 310 мм, а также наличием опор для полюсов для выключателей, рассчитанных на ток электродинамической стойкостью 128 кА и типом и мощностью унифицированного электромагнитного привода.

Таблица 3.8

Наименование параметра	ВРС 6	ВРС 10
Номинальное напряжение, кВ	6	10
Номинальное рабочее напряжение, кВ	7,2	12
Номинальный ток, А	630, 1000, 1250, 1600 2000, 2500, 3150, 4000	630, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000
Номинальный ток отключения, кА	31,5, 40	20, 31,5, 40
Ток термической стойкости, кА	31,5, 40	20, 31,5, 40
Ток электродинамической стойкости, кА	80, 102, 128	52, 80, 102
Полное время отключения (не более), мкс	70	65
Собственное время включения (не более), мкс	120	90-120
Собственное время отключения (не более) мкс	30,55	35,50
Механический ресурс, циклов ВО	30000	3000,100000
Коммутационный ресурс циклов ВО: при номинальных токах; при номинальных токах отключения.	30000,10000 40,50	30000,50000,10000 40, 50,100
Масса, кг	126-225	126-225

На рисунке 3.16 и в таблице 3.9 показан внешний вид и технические параметры вакуумных генераторный выключателей напряжением 10 кВ серии ВГГ – 10 на номинальный ток 5000 кА, ток отключения 63 кА и ток электродинамической стойкости 163 кА.

Выключатель является эксклюзивной разработкой «НТЭАЗ Электрик» и не имеет аналогов в мировой практике. Он предназначен для установки в цепях генераторов и для замены выключателей типа ММГ – 10. Полюса выключателя устанавливаются на раме и управляются электромагнитным приводом.



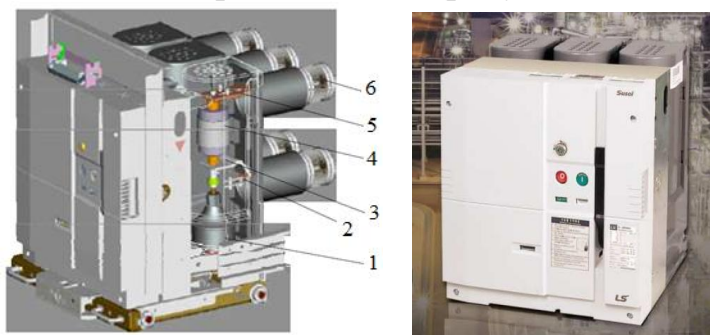
Рисунок 3.16 - генераторный выключатель ВГГ – 10

Таблица 3.9

Наименование параметра	ВГГ -10
Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальное рабочее напряжение, кВ	12
Номинальный ток, А	4000,5000
Номинальный ток отключения, кА	63
Ток термической стойкости, кА	63
Ток электродинамической стойкости, кА	161
Полное время отключения (не более), мкс	100
Собственное время включения (не более), мкс	80
Собственное время отключения (не более) мкс	50
Механический ресурс, циклов ВО	10 000
Масса, кг	360

### 3.8 Вакуумные выключатели других производителей

В Южной Корее на основе ВДК фирмы Siemens и других высококачественных комплектующих производятся высоковольтные вакуумные выключатели LS серии VL Susol (рисунок 3.17).



1 - изоляционный стержень; 2 - нижний вывод; 3 - шунт; 4 – ВДК; 5 - верхний вывод; 6 - лепестковый контакт.

Рисунок 3.17 – Вакуумные выключатели серии Susol

В базовую комплектацию выключателей входят собственно выключатель, мотор-привод, катушка включения, катушка отключения и дополнительные контакты. Некоторые технические характеристики приведены в [18 19].

Параметры серийно выпускаемых и готовых к серийному выпуску вакуумных выключателей в разных классах напряжения некоторых фирм изготовителей приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Параметры вакуумных выключателей

Страна, фирма	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Номинальный ток отключения, кА	Номинальный ток, А
Россия, ВЭИ	12	50	3150
	24	100	1600
	40,5	31,5	2500
США, «Вестингауз»	12	50	3150
	24	31,5	3150
	12	50	3150
Япония, «Toshiba»	24	25	2000
	36	25	2000
	13.8	100	3000
Япония, «Mitsubishi Electric»	15/12	37/50	2000
	25,8	31,5	2000
	38	31,5	2000
ФРГ, «Siemens»	15	63	4000
	24	25	2000
	36	31,5	2500

#### 4 Вакуумные выключатели напряжением 35 кВ и выше

Для напряжения 35 кВ для ОРУ 35 кВ компания Siemens предлагает вакуумные силовые выключатели 3AF0143. Общий вид выключателя приведен на рисунке 4.1.



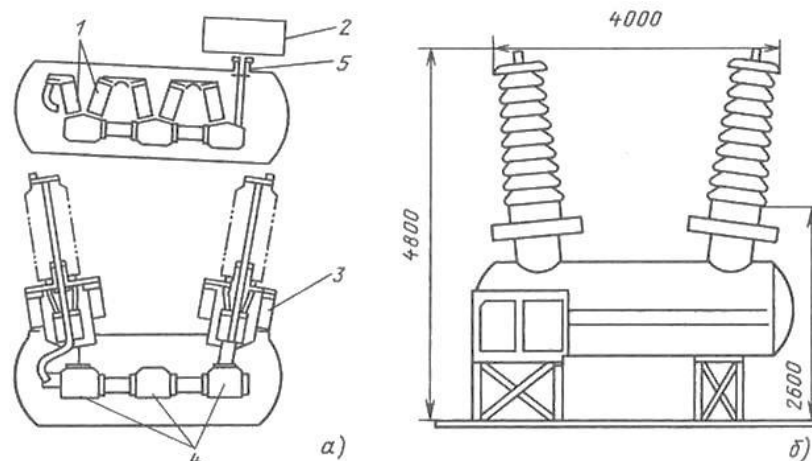
Рисунок 4.1 – Общий вид силового вакуумного выключателя 3AF0143

В выключателе использована дугогасительная камера в фарфоровых изоляторах собственного производства. Выключатель характеризуется большим электрическим и механическим ресурсом, долговечностью и повышенной стойкостью к вибрациям [21].

На российском предприятии ОАО «Самарский трансформатор» (г.Самара) по технологии выключателей марки 3AF01 фирмы Siemens собираются вакуумные выключатели ВВСТ-35 (3AF01) наружной установки. Эти легко устанавливаемые аппараты простой конструкции предназначены для использования в сетях и системах напряжением 35 кВ. В нем также используются вакуумные камеры фирмы Siemens в фарфоровой изоляции [11].

Конструкция вакуумного выключателя ВВСТ 35 (3AF01) проста и надежна, отсутствие большого числа деталей и подвижных элементов обеспечивает высокий механический и коммутационный ресурс. Выключатели серии ВВСТ 35 (3AF01) обладает всеми преимуществами вакуумных выключателей.

Фирмой «Дженерал Электрик» (США) построен выключатель с номинальным напряжением 242 кВ и пятью камерами 45 кВ/40 кА, включенными последовательно. Камеры каждого полюса помещены в стальной цилиндрический бак с проходными изоляторами и встроенными трансформаторами тока (рисунок 4.2).



*а* - размещение вакуумных камер в кожухе: *1* - вакуумные камеры; *2* - привод; *3* - трансформаторы тока; *4* - рычажная система; *5* - уплотнение; *б* - внешний вид выключателя.

Рисунок 4.2. – Вакуумный выключатель фирмы «Дженерал Электрик» с номинальным напряжением 242 кВ

Бак заполнен элегазом при давлении 0,1 МПа для увеличения разрядного напряжения по поверхности вакуумных камер. Никакого отношения к гашению дуги элегаз не имеет. Подвижные контактные стержни вакуумных камер соединены между собой (рычажной системой), а также с пружинным приводом, обеспечивающим необходимое давление в контактах во включенном положении и достаточную скорость перемещения контактов при их размыкании. Стальной бак заварен наглухо на весь срок службы выключателя (около 20 лет) [1].

В 1979 году в Японии был представлен высоковольтный выключатель (VCB), напряжением 168 кВ/31,5 кА, с двойным разрывом цепи. Однако даже при высоком пробивном напряжении, он был слишком дорогостоящим и громоздким (рисунок 4.3) [9].

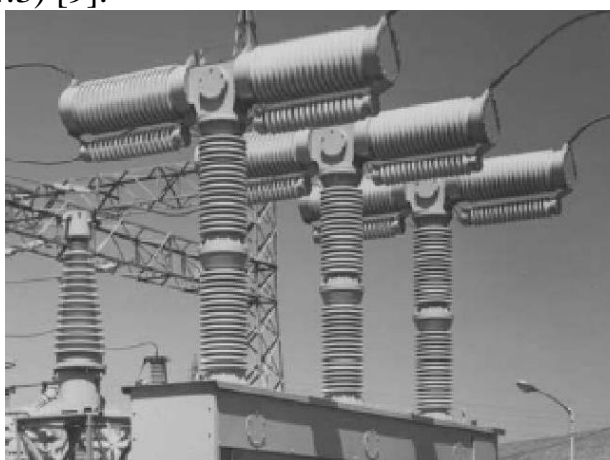


Рисунок 4.3 – Вакуумный высоковольтный выключатель с двойным разрывом цепи напряжением 168 кВ, 31,5 кА

В 1989 году группа исследователей из Китая представила вакуумный выключатель с двойным разрывом цепи напряжением 126 кВ/31,5 кА / 1,25 кА, путем использования двух вакуумных камер напряжением 72,5 кВ.

Зазор между разомкнутыми контактами составлял 40мм в длину для каждого прерывателя. Был применен тип осевого напряжения электрического поля и наружная элегазовая изоляция. Выключатель был всего лишь 2650мм в высоту (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4– Вакуумный высоковольтный выключатель с двойным разрывом цепи напряжением 126 кВ

В 2002 году в Японии был разработан еще один вакуумный высоковольтный выключатель компанией AE PowerSystemCorporation, которая внесла улучшения во внешний вид предыдущего выключателя (рисунок 4.5). Номинальное напряжение данного выключателя составляет 145 кВ, с 40 кА током короткого замыкания и номинальным током в 2 кА.

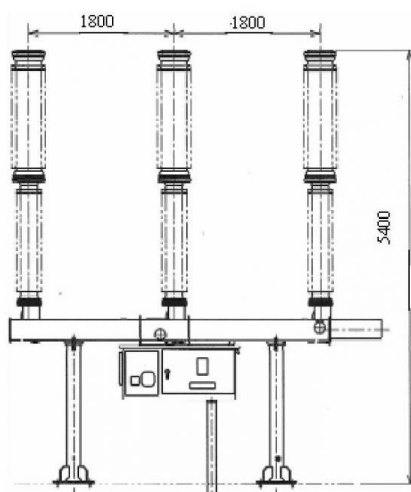


Рисунок 4.5 – Вакуумный высоковольтный выключатель с одинарным разрывом цепи 145 кВ/40 кА/2 кА

В 2003 году был создан вакуумный высоковольтный выключатель с одинарным разрывом цепи напряжением 126 кВ/40 кА/2 кА (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Вакуумный высоковольтный выключатель с одинарным разрывом цепи напряжением 126 кВ/40 кА/2 кА

В 2010 г. началось серийное производство первого российского вакуумного выключателя 110 кВ и ВВП-110кВ [9], разработанного в ОАО НПП «Контакт». Параметры выключателя ВВП-110 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические параметры выключателя ВВП-110

Номинальное напряжение, кВ	126
Номинальный ток, А	2000
Номинальный ток отключения, кА	31,5
Ток электродинамической стойкости, кА	80
Ток термической стойкости, кА	31,5
Собственное время включения, мс	85
Собственное время отключения, мс	30
Тип провода	пружинный
Ресурс по механической стойкости	10 000
Ресурс по коммутационной стойкости	10 000
Ресурс по коммутационной стойкости при нормальном токе отключения	25 циклов ВО
Категория размещения и климатическое исполнение	УХЛ 1

Основываясь на 40 летнем опыте производства вакуумных выключателей и 3-х миллионах изделий, находящихся в эксплуатации, компания Siemens предлагает новый вакуумный выключатель типа 3AV с одним разрывом на фазу напряжением до 145 кВ. Прототипы этих выключателей на напряжение 72,5 кВ т 145 кВ уже установлены в электрических сетях Европы (рисунок 4.7). Отличительной особенностью этих выключателей является использование азота в качестве изоляционной среды и гашения дуги в вакуумных камерах собственного производства.

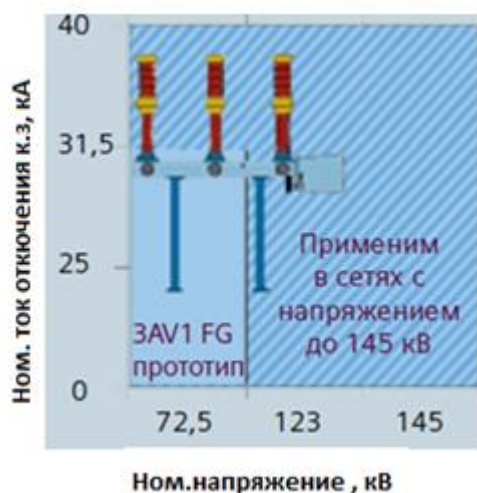


Рисунок 4.7 - Области использования выключателя 3 AV1 FG и вакуумные гасительные камеры на 72,5 кВ и 145 кВ

Таблица 4.2 - Технические характеристики выключателя 3AV1 FG

Номинальное напряжение, кВ	72,5
Испытательное напряжение промышленной частоты (1 мин), кВ	140
Испытательное напряжение грозового импульса, кВ	325
Испытательное напряжение коммутационного импульса, кВ	-
Номинальный ток, А	2500
Номинальный кратковременный ток (1 мин),кА	31,5
Номинальный ток отключения,кА	31,5
Диапазон температур, °С	От -55 до + 40
Номинальные коммутационные циклы	О -03 s-CO-3 min-CO CO-15 s-CO
Диапазон температур, °С	От -55 до + 40
Номинальные коммутационные циклы	О -03 s-CO-3 min-CO CO-15 s-CO
Номинальное время отключения	2 цикла

Нижнетуринский электроаппаратный Концерн «Высоковольтный союз» также выпускает вакуумные выключатели на напряжения 35 кВ и выше [22].

На рисунке 4.8 и в таблице 4.3 показаны внешний вид и технические параметры вакуумных выключателей серии ВР- 35 с номинальным током 2000 А, номинальным током отключения до 20 кА и номинальным током электродинамической стойкости до 52 кА, ВБЦ- 35 и ВБР – 35 с

номинальным током 1800 А, номинальным током отключения до 20 кА и номинальным током электродинамической стойкости до 80 кА.



Рисунок 4.8

Выключатель ВР-35 предназначен для работы в комплектных распределительных устройствах 35 кВ внутренней установки серии КУ 35 производства «НТЗАЗ Электрик» и могут использоваться в КРУ 35 кВ других производителей.

Выключатели ВБЦ- 35 и ВБР- 35 внутренней установки разработаны специально для металлургических предприятий.

Таблица 4.3

Наименование параметра	ВР-35	ВБЦ-35	ВБУ-35
Номинальное напряжение, кВ	35		
Номинальное рабочее напряжение, кВ	40,5		
Номинальный ток, А	600,800,1000, 1250, 1600, 2000	1600	1600
Номинальный ток отключения, кА	20	20	5
Ток термической стойкости, кА	20	20	20
Ток электродинамической стойкости, кА	52	80	80
Полное время отключения (не более), мкс	65	85	85
Собственное время отключения (не более), мкс	35-50	60	60
Механический ресурс, циклов ВО	30000	50000	100000
Коммутационный ресурс циклов ВО: при номинальных токах; при номинальных токах отключения.	30000 55	20000 50	20000 150
Масса, кг	250/310	450	400

На рисунке 4.9 и в таблице 4.4 приведены внешний вид и технические характеристики вакуумных выключателей на напряжение 35 кВ наружной установки ВР35НС, ВР35НСМ, ВР35 НТ и ВРНК35 с номинальным током до 2000 А, номинальным током отключения до 25 кА и номинальным током электродинамической стойкости до 64кА.



Рисунок 4.9

Все эти выключатели имеют унифицированную конструкцию и предназначены для комплектных трансформаторных подстанций российского производства и распределительных устройств тяговых подстанций железных дорог, а также для замены воздушных и масляных выключателей, отработавших свой ресурс. Отличаются друг от друга типами приводов. Температурный диапазон от +50° С до – 60° С.

Таблица 4.4

Наименование параметра	ВР 35 НС	ВР35НСМ	ВР35НТ	ВБНК35
Номинальное напряжение, кВ	35	35	35	35
Номинальное рабочее напряжение, кВ	40,5	40,5	40,5	40,5
Номинальный ток, А	1600, 2000	1600	1600	1600
Номинальный ток отключения, кА	20	20	25	25
Ток термической стойкости, кА	20	20	25	25
Ток электродинамической стойкости, кА	52	52	64	64
Полное время отключения (не более), мкс	76	70	80	70
Собственное время включения (не более), мкс	100	100	80	150
Собственное время отключения (не более) мкс	30-50	50	60	30
Механический ресурс, циклов ВО	30000	30000	25000	25000
Коммутационный ресурс циклов ВО: при номинальных токах; при номинальных токах отключения.	30000 55	30000 55	20000 30	20000 34
Масса, кг	525	520	640-1650	767

Общий вид вакуумного выключателя на напряжение 110 кВ типа ВРС - 110 приведен на рисунке 4.10.

Этот выключатель на номинальный ток до 3150 А, номинальный ток отключения до 40 кА и номинальный ток электродинамической стойкости до 102 кА, является первым выключателем с одним разрывом на фазу и собственной разработкой Высоковольтного Союза.



Рисунок 4.10

Выключатель предназначен для комплектации открытых РУ 110 кВ, расширения существующих РУ и замены устаревших масляных и воздушных выключателей. Выключатель комплектуется пружинным приводом, имеет цельнолитые полюса из кремнийорганической изоляции и специально разработанную вакуумную камеру.

Технические характеристики выключателя приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Наименование параметра	ВРС -110	
Номинальное напряжение, кВ	110	
Номинальное рабочее напряжение, кВ	126	
Номинальный ток, А	1250	3150
Номинальный ток отключения, кА	31,5	40
Ток термической стойкости, кА	31,5	40
Ток электродинамической стойкости, кА	81	102
Полное время отключения (не более), мкс	47	80
Собственное время отключения (не более), мкс	32	
Механический ресурс, циклов ВО	10000	
Коммутационный ресурс циклов ВО: при номинальных токах; при номинальных токах отключения.	10000	25
Масса, кг	1645	

## Заключение

Перечислять и описывать все типы вакуумных выключателей и все фирмы, выпускающие их, практически невозможно, да и нет необходимости.

Вакуумные выключатели различных производителей соответствуют предъявляемым требованиям и для одного класса напряжения отличаются между собой техническими параметрами, назначением, типом привода и его кинематикой, размерами, весом, дизайном и являются доминирующим типом коммутационного аппарата в сетях среднего класса напряжения 6 кВ–35 кВ.

Так, доля вакуумных выключателей в общем количестве выпускаемых аппаратов в Европе и США превышает 70 %, в Японии – 100 %. В России в последние годы эта доля имеет постоянную тенденцию к росту и превысила 60%. Существенно расширяется объем использования вакуумных выключателей и в Казахстане.

Этому способствуют существенные преимущества вакуумных выключателей перед другими типами коммутационных устройств, а пожалуй, единственным их недостатком на сегодня является стоимость.

Наконец, вакуумные выключатели, в силу своих достоинств, уже представляют серьезную конкуренцию выключателям с элегазовой изоляцией на напряжение 110 кВ и выше, хотя на этих классах напряжений им серьезную конкуренцию составляют элегазовые выключатели.

Дело в том, что в последние годы все более настойчиво обсуждается основной недостаток элегазовых выключателей – влияние элегаза на окружающую среду, в то время как вакуумные выключатели являются экологически чистыми аппаратами.

В то же время создание вакуумных выключателей на напряжение 500 кВ и выше представляет серьезные, а возможно и непреодолимые трудности. Кроме того, на базе вакуумных выключателей вряд ли возможно создание изолированных от внешней среды, комплектных распределительных устройств, как это имеет место при использовании элегаза.

Во всяком случае, вакуумные выключатели являются основным массовым коммутационным аппаратом на напряжения 6 кВ - 35 кВ и, возможно, потеснят позиции элегазовых аппаратов на напряжения 110 кВ - 220 кВ.

## Список литературы

- 1 [http://www.gigavat.com/viklyuchateli\\_vakuumnje.php](http://www.gigavat.com/viklyuchateli_vakuumnje.php). Вакуумные выключатели;
- 2 Набатов К.А., Афонин В.В. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств. Тамбов. Издательство ВПО ТГТУ. 2010.
- 3 Вакуумные коммутационные аппараты / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.А. Евдокимов и др. - СПб., 1995. – 62.
- 4 Эксплуатация электрических аппаратов/ Г.Н. Александров, А.И. Афанасьев, В.В. Борисов и др ; Под ред. Г.Н. Александрова. - СПб.: Изд. ПЭИПК, 2000. - 307 с.: ил.
- 5 Румянцев, Д.Е. Современное вакуумное коммутационное электротехническое оборудование сетей и подстанций / Д.Е. Румянцев. - М.: ИПК госслужбы, 2000. – 71.
- 6 Высоковольтные вакуумные выключатели. Устройство и принцип работы.<http://electricalschool.info/main/visokovoltny/1687-vysokovoltnye-vakuumnye-vykljuchateli.html>.
- 7 Алексеев С.В., Николаев П.Д. ВВСТ- вакуумный выключатель Siemens российского производства. Новости электротехники. №2(32) 2005.
- 8 Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Перцев А.А., Потокин В.С., Ромочкин Ю.Г., Шохин Е.А.Вакуумные дугогасительные камеры, разработанные Всесоюзным электротехническим институтом имени В.И. Ленина. <http://forca.ru/knigi/arhiv/vakuumnye-dugogastelnye-kamery-7.html>.
- 9 Назарычев А., Суворов А., Чайка В., Таджибаев А. Перспективы применения вакуумных выключателей 110-220 кВ. <http://forca.ru/stati/podstancii/>.
- 10 Высоковольтные выключатели: элегаз против вакуума. <http://forca.ru/stati/podstancii/vysokovoltnye-vyklyuchateli-elegaz-protiv-vakuuma.html>.
- 11 <http://volga.prom-rus.com/cat-elektrotehnicheskaya-prodykciya/apparatura-visokovoltnaya/15784/>.
- 12 <http://forca.com.ua/arhiv/pidstancii/vakuumnye-vyklyuchateli-siemens-dlya-srednih-klassev-napryazhenii.html>;
- 13 <http://forca.ru/new/novosti/siemens-razrabotala-kompaktnyy-vakuumnyy-vyklyuchatel.html> (Siemens разработала компактный вакуумный).
- 14 Выключатель фирмы Siemens «SION 3AE1» 12кВ, 800А (<http://www.studfiles.ru/preview/3015475/>);
- 15 [http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollectionDocuments/en/mv/indoor-devices/vacuum-circuit-breaker/sion/catalogue-sion-vacuum-circuit-breakers\\_ru.pdf](http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollectionDocuments/en/mv/indoor-devices/vacuum-circuit-breaker/sion/catalogue-sion-vacuum-circuit-breakers_ru.pdf).
- 16 <http://www.sineps.com.ua/node/542>
- 17 [www.siemens.com/SION](http://www.siemens.com/SION)Вакуумные силовые выключатели SION 3AE5 и 3AE1.
- 18 <http://aetz.kz/p2349648-vakuumnyj-vyklyuchatel-siemens.html>.

- 19 <http://www.pea.ru/docs/equipment/nku-main/ls/ls-vacuum/>.
- 20 <http://electrocontrol.com.ua/vysokovoltnoe-oborudovanie/vakuumnye-vyklyuchateli-serii-susol-vl-tm-ls-koreya.html>.
- 21 <http://electricalschool.info/main/visokovoltny/1687-vysokovoltnye-vakuumnye-vykljuchateli.html>.
- 22 [http://www.vsoyuz.com/modules/pages/files/catalogue\\_VS.pdf](http://www.vsoyuz.com/modules/pages/files/catalogue_VS.pdf).

## Содержание

	Введение .....	3
1	Особенности процесса разряда в вакууме .....	5
2	Вакуумные дугогасительные камеры и их особенности .....	22
3	Вакуумные выключатели среднего напряжения до 35 кВ .....	34
	3.1 Общие сведения .....	34
	3.2 Вакуумные выключатели компании Siemens .....	35
	3.3 Вакуумные выключатели ОАО «Самарский трансформатор» .....	40
	3.4 Вакуумные выключатели ОАО «ЭЛКО» (г. Минусинск) ..	41
	3.5 Выключатели Государственного НПП «Контакт» (г. Саратов) .....	43
	3.6 Вакуумные выключатели ОАО «Таврида электрик» .....	45
	3.7 Вакуумные выключатели производства Концерна «Высоковольтный союз» (Нижнетуринский электроаппаратный завод (ООО «НТЭАЗ Электрик»)) .....	51
	3.8 Вакуумные выключатели других производителей .....	57
4	Вакуумные выключатели напряжением 35 кВ и выше .....	58
	Заключение .....	66
	Список литературы .....	67