

Создание выключателей переменного тока высокого напряжения

Ю.В. Черников

(Продолжение. Начало см. ЭП, № 9, 2008 г.)

Рост мощности электрических станций и повышение напряжения линий электропередачи способствовали по созданию такого выключателя, который был бы способен отключать не только рабочие токи, но и токи коротких замыканий. Все известные к концу XIX века конструкции выключателей с открытой дугой в воздухе не отвечали этим требованиям.

Увеличение мощности электрических станций сопровождалось также и ростом мощности отдельных агрегатов. Успехи в конструировании мощных агрегатов сильно уменьшили их реактивность, что еще более утяжелило условия работы выключателей, так как значительно возросли токи короткого замыкания. Особенно остро стоял вопрос о создании надежных выключателей в тех странах, где интенсивно развивалось строительство электростанций и линий электропе-

редачи – в Англии, Швейцарии, США и Германии. Именно в этих странах почти одновременно и был изобретен масляный выключатель [1].

Первое применение масла в качестве дугогасящей и изолирующей среды в выключателе было предложено Э. Томсоном, который 14 ноября 1893 г. получил американский патент № 508652 на масляный выключатель. В этом выключателе во включенном его положении подвижные и неподвижные контакты находились над поверхностью масла. При отключении выключателя электрическая дуга загоралась в воздухе, а затем при перемещении подвижного контакта дуга затягивалась в масло, где и гасилась.

Масляный выключатель Себастьяна Циани де Ферранти по используемой в нем идее дугогашения был аналогичен выключателю Томсона, но был запатентован в Англии на два года позже, чем это сделал Томсон в США. Выключатель Ферранти отличался от выключателя Томсона наличием в нем двух пар контактов, а именно рабочих и дугогасительных. Рабочие контакты размыкались раньше дугогасительных. Этот выключатель предназначался для напряжения до 3 кВ и был установлен у генераторов Дентфордской электростанции. Использование в этом выключателе рабочих и дугогасящих контактов являлось весьма прогрессивным техническим предложением.

Следует, однако, отметить, что выключатели Томсона и Ферранти нельзя считать масляными в современном понимании этого термина, так как электрическая дуга при отключении образовывалась не в масле, а в воздухе.

Над проблемой создания нового типа выключателя также работал американский инженер Всеобщей электрической компании (GE) Хьюлетт. Первый трехбаковый масляный выключатель для распределительного устройства 6 кВ Бруклинской электрической станции в Нью-Йорке был изготовлен Хьюлеттом в 1898 г. На рис. 1 представлен общий вид этого выключателя. По углам треугольника установлены три деревянных цилиндрических бака 1, наполненных

маслом. На плите 2 укреплены подвижные контакты 3 в виде перевернутой буквы V. Неподвижные контакты помещены на дне деревянных баков 1 и ток к ним подводился кабельными вводами снизу. На станине 4 помещен пневматический привод 5, при помощи которого плита 2 с подвижными контактами 3 при отключении поднимается вверх, благодаря чему под слоем масла получают два разрыва цепи тока на полюс.

В 1897 – 1898 гг. швейцарская фирма «Браун-Бовери» оборудовала в Падерно электрическую станцию для снабжения электроэнергией Милана. Общая мощность трехфазных генераторов на станции составляла 10000 кВт при напряжении на шинах 13,5 кВ. На этой электростанции были смонтированы масляные выключатели (рис. 2), сконструированные Ч. Брауном, которые в 1898 г. были защищены швейцарским патентом № 17901. Каждая фаза выключателя была снабжена двумя рабочими контактами 1, находящимися в воздухе, и четырьмя дугогасительными контактами 2, находящимися в масляном баке 3. При отключении вначале размыкались рабочие контакты 1, при дальнейшем повороте вала выключателя натягивались пружины 4, дугогасительные контакты 2 размыкались, и на этом процесс отключения заканчивался.

Примененные Брауном многократные разрывы электрической дуги, глубокая установка под слоем масла дугогасительных контактов и их быстрое разведение под действием натяжения пружин создали все необходимые условия для хорошей работы выключателя. Предложенные Брауном масляные выключатели совершенно свободно отключали рабочие токи генераторов, а именно – 80 А, при 14500 В. Для отключения токов коротких замыканий последовательно с масляным выключателем устанавливался плавкий предохранитель высокого напряжения.

В 1902 г. Ферранти построил масляный выключатель для напряжения 15 кВ (рис. 3), у которого так же, как и у выключателя Брауна, процесс образования и гашения электрической дуги при отключении выключателя происходил полностью под

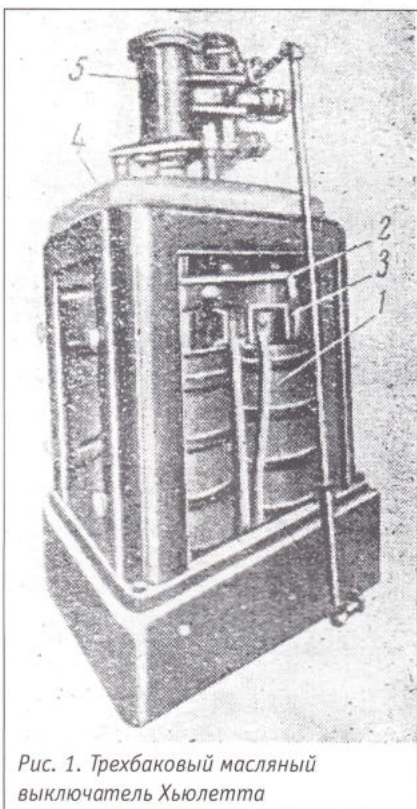


Рис. 1. Трехбаковый масляный выключатель Хьюлетта



слоем масла. Выключатель барабанного типа имел рабочие неподвижные контакты 1 и 2 и подвижные контакты 3, находящиеся в воздухе. Семь дугогасительных контактов в виде поворачивающихся ножей 4 были насажены на поворотный вал 5, на котором установлены и подвижные рабочие контакты 3. Неподвижные дугогасительные контакты 6 и 7 соединены последовательно друг с другом так, что при отключении получается одновременно 14 разрывов цепи тока на фазу. Входной и выходной неподвижные контакты 6 и 7 подсоединены параллельно к рабочим неподвижным контактам 1 и 2. При повороте вала 5 вначале отключались рабочие контакты, а затем в цилиндрическом баке 8, заполненном маслом, происходил разрыв тока в 14 местах между дугогасительными контактами.

В конце XIX столетия германская электропромышленность по объему выпуска электротехнической продукции занимала первое место в Европе и являлась ведущей в техническом отношении. Однако, как это было сказано выше, масляные выключатели были изобретены в США, Англии и Швейцарии. Масляные выключатели в Германии стали изготавливать только в начале XX столетия, и сначала они копировали американские выключатели.

Следует отметить, что после изобретения масляного выключателя роговые выключатели в Европе больше не применялись. В США же они изготавливались и применялись на открытых подстанциях с напряжением 50 – 100 кВ в течение первых двух десятилетий XX столетия.

На рис. 4 показана конструкция рогового выключателя, предназначенного для сетей напряжением 100 кВ. Мощность отключения этого рогового выключателя составляла 5000 кВт. Выключатель имел две колонны изоляторов 1 и 2, установленные в одной вертикальной плоскости и расположенные под углом 60° одна по

отношению к другой. На концах колонн изоляторов 1 и 2 были укреплены контакты 3 и 4, несущие рога 5 и 6. При отключении колонны изоляторов 1 и 2 поворачивались в разные стороны, и дуга распространялась вдоль рогов до ее обрыва. Проведенные испытания показали, что электрическая дуга при напряжении линии 112 кВ достигала в длину 4,5 м. После 1930 г. американские компании отказались от роговых выключателей, оставив их лишь в роли разъединителей.

Следующим важным шагом в развитии дугогасительных устройств выключателей переменного тока высокого напряжения явилось изобретение «устройства, ограничивающего размеры дуги, возникающей при отключении электрических цепей», впоследствии получившего название деионного выключателя. В 1912 г. фирма АЕГ (Германия) подала и 1 ноября 1913 г. получила германский патент № 266745 на этот выключатель. Автором изобретения был русский ученый Михаил Осипович Доливо-Добровольский [2, 3], который проработал много лет в этой фирме и был техническим директором ее аппаратостроительного завода. Схема этого устройства показана на рис. 5. При работе выключателя вначале расходятся рабочие контакты 7 и 8, а затем дугогасительные – 1 и 2. Над местом разрыва дугогасительных контактов помещена искрогасительная решетка, составленная из отдельных металлических пластин 3, электрически изолированных друг от друга. Под действием магнитного поля катушек 4 электрическая дуга переходила на рога 5 и искрогасительной решеткой разбивалась на ряд отдельных коротких дуг 6. Количество пластин искрогасительной решетки подбиралось из того расчета, чтобы на каждую короткую дугу приходилось напряжение меньше требуемого для ее зажигания. Для переменного тока таким напряжением Доливо-Добровольский

считал 300 В (амплитудное значение). Общий вид опытного образца выключателя Доливо-Добровольского с искрогасительной решеткой показан на рис. 6, где 1, 2 – стенки из асбоцемента, между которыми заключена система медных пластин; 3 – катушка магнитного дутья. Несмотря на благоприятные результаты испытаний, в 1914 г. (при переменном напряжении 550 В и безындуктивной нагрузке надежно разрывался ток 1300 А), изобретение Доливо-Добровольского не получило практического применения и было упрятано в сейфы фирмы АЕГ. Это объяснялось, согласно более позднему свидетельству сотрудников фирмы, тем обстоятельством, что как раз в это время начали применять масляные выключатели, и внимание электротехнических фирм целиком переключилось на новый тип выключателя. Сам же Доливо-Добровольский, как русский поданный, в 1914 г. должен был оставить Германию и переселиться в Швейцарию.

В 1928 г. доктор Джозеф Слепня, шеф-электрик фирмы Вестингауз (США) построил высоковольтный выключатель, названный им деионным [4, 5]. В этом выключателе (рис. 7) неподвижный 2 и подвижный 3 контакты, а также дугогасительная решетка 4 смонтированы на стойке 1. Под действием магнитного дутья, создаваемого витком 5, электрическая дуга 6 переходила на рога 7, а затем «загонялась» в дугогасительную решетку 4, выполненную из отдельных металлических пластин 8, электрически изолированных друг от друга. Попадая между пластинами 8, электрическая дуга разрезалась на короткие дуги, включенные в цепь тока последовательно. Каждая из этих коротких дуг обладала катодным напряжением зажигания (амплитудным) 250 В. При переходе тока через нулевое значение все короткие электрические дуги гасли, и для их повторного зажигания требовалось напряжение, равное числу пластин решет-

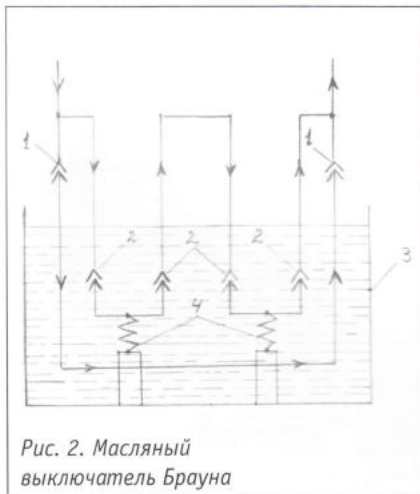


Рис. 2. Масляный выключатель Брауна

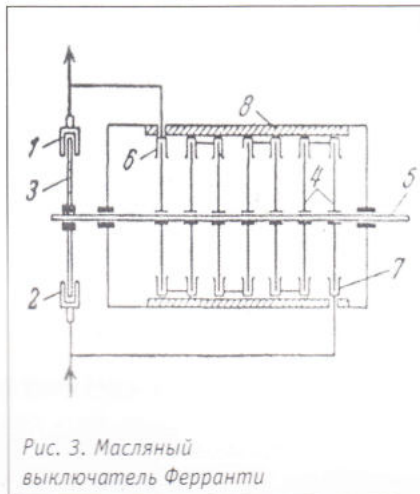


Рис. 3. Масляный выключатель Ферранти

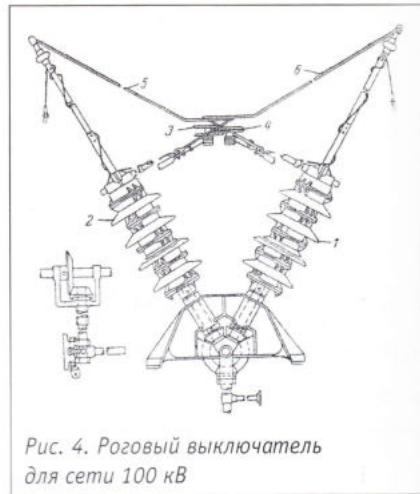


Рис. 4. Роговой выключатель для сети 100 кВ

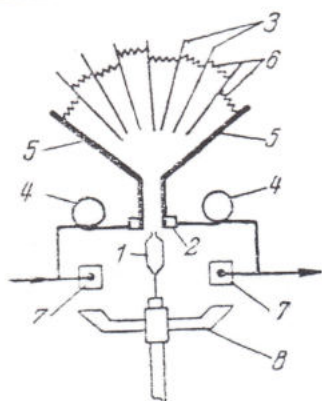


Рис. 5. Выключатель с искрогасительной решеткой Доливо-Добровольского

ки 4 минус одна, умноженному на 250. Между пластинами 8 были установлены катушки 9, концы обмоток которых подключались к двум соседним пластинам 8. Ток, протекавший по дуге, обтекал обмотки катушек 9, создавая вокруг них магнитное поле. Направление витков двух соседних катушек было выбрано таким способом, чтобы создаваемые ими магнитные потоки направлялись один против другого. Такое направление потоков и создавало в промежутках между пластинами радиально направленное магнитное поле. Силы взаимодействия между этим полем и короткими электрическими дугами, горящими между соседними пластинами 8, приводили эти дуги во вращение вокруг втулки 10, т.е. во время их горения они находились в соприкосновении с холодными электродами. При этом скорость вращения дуг достигала нескольких тысяч оборотов в секунду. При первом же переходе тока через нулевое значение происходило гашение электрических дуг. Магнитное поле, создаваемое витком 5, «прижимало» вращающиеся электрические дуги к внешней поверхности втулки 10.

Сопоставление выключателей Доливо-Добровольского и Слепяна показывает, что Слепян по существу повторил основную идею выключателя Доливо-Добровольского. Отличительной особенностью выключателя Слепяна явилось создание вращения коротких электрических дуг в дугогасительной решетке, что обеспечивало дополнительный отвод тепла от дуги.

Важным научным результатом стала гипотеза об околоскатном эффекте [6, 7], выдвинутая Слепяном для объяснения принципа действия дугогасительной решетки. Слепян допускал, что в момент перехода тока через «ноль» положительные ионы и отрицательные электроны равномерно распределены в дуговом промежутке. При появлении напряже-

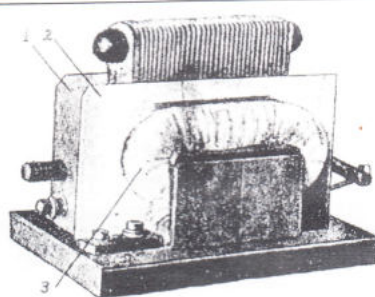


Рис. 6. Модель камеры с искрогасительной решеткой Доливо-Добровольского

ния обратного знака «быстрые» электроны уйдут от катода, а ионы практически останутся неподвижными. У катода образуется слой положительных ионов. Далее Слепян, полагая, что уменьшение количества ионов у катода происходит вследствие рекомбинации, нашел выражение для определения пробивного напряжения околоскатного слоя и вычислил его величину: 176 В (эффективное значение). При этом время достижения околоскатным слоем указанной прочности равно десятым долям микросекунды, т.е. при принятых допущениях прочность за переходом через «ноль» должна восстанавливаться практически мгновенно. Если имеется ряд последовательно соединенных промежутков, то в каждом из них должен образовываться свой околоскатный слой, обладающий по существу свойствами изолятора. Результирующая прочность должна быть равна сумме прочностей отдельных промежутков. Таковы основные положения гипотезы Слепяна об околоскатном эффекте. Каких-либо данных физических исследований, подтверждающих закономерности микропроцессов у катода за нулем тока, Слепян не приводит. Он лишь определил опытным путем электрическую прочность «коротких» промежутков в разные моменты времени после перехода тока через «ноль».

Исследованию подвергся изготовленный деионный трехфазный выключатель на 15 кВ, 2000 А. Он выдержал 12 трехполосных отключений при 12 кВ и токах от 7000 до 13000 А за время испытания 1 ч 42 мин. По этому принципу фирма «Вестингауз» строила выключатели и на более низкое напряжение в пределах 440 – 2300 В.

В 1929 г. инженеры фирмы «Вестингауз» Беккер и Елиис применили тот же принцип для гашения дуги в контакторах.

Следует отметить, что последующие исследования и опыт эксплуатации дугогасительных решеток выключателей, построенных на принципе использования

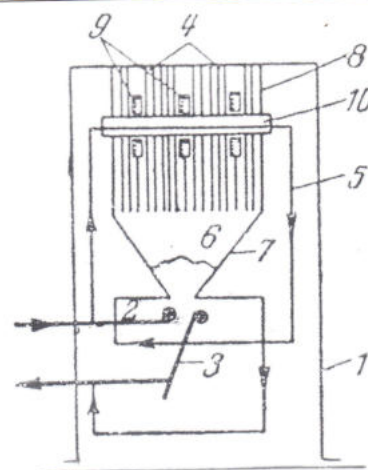


Рис. 7. Деионный выключатель фирмы «Вестингауз»

околоскатного эффекта, показали, что в ряде случаев процессы в них не подчиняются в полной мере тем закономерностям, которые были указаны Слепяном. Но это ни в коей мере не умаляет значение его работы.

После того как в 1928 г. фирма «Вестингауз» выпустила деионный выключатель, фирма АЕГ опубликовала изобретение Доливо-Добровольского. В сборнике «Forschung und Technik» за 1930 г. была помещена статья инженеров фирмы АЕГ Кона и Ульбриха под заголовком «Многоискровая камера для воздушного выключателя Доливо-Добровольского». В статье указывалось на авторство Доливо-Добровольского по созданию выключателя с деионной решеткой и приводились данные о результатах его испытаний.

Литература:

1. Гусев С.А. Очерки по истории развития выключателей переменного тока. – М.: ГЭИ, 1958, – С. 67 – 81.
2. Веселовский О.Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский. – М.: ГЭИ, 1958. – С. 178 – 190.
3. Брон О.Б. М.О. Доливо-Добровольский – изобретатель искрогасительной решетки, «Электричество», 1949, № 9, – С. 71 – 73.
4. Смуров А.А. Электротехника высокого напряжения и передача энергии, т. 1, изд. второе. – М.-Л.: ГНТИ, 1931. – С. 270 – 272.
5. Бабинов М.А. Электрические аппараты, ч. 1, Основы теории. – М.-Л.: ГЭИ, 1951. – С. 332 – 333.
6. Slepian J. Theory of the deion circuit – breaker. Tr. AIEE, 1929, № 4.
7. Таев И.С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. – М.-Л.: ГЭИ, 1965. – С. 103 – 113.

(Продолжение следует)