



Создание выключателей переменного тока высокого напряжения

Ю.В. Черников

(Продолжение. Начало см. ЭП, № 9 – 10, 2008 г.)

Вся история создания силовых выключателей высокого напряжения есть, прежде всего, история изучения электрической дуги и способов ее гашения. Явление электрической дуги было открыто в 1802 г. русским ученым академиком Василием Владимировичем Петровым. В 1808 – 1809 гг. это же явление электрической дуги открыл, независимо от Петрова, английский физик и химик Хамфри Дэви. Светящийся токовый канал гальванического разряда батареи (источника питания) был дугообразно изогнут, что и обусловило название этого явления. Следует отметить, что опыты Петрова и Дэви, для которых требовалась мощная батарея, состоящая из нескольких тысяч элементов, было достаточно трудно повторить. Поэтому, когда в июле 1820 г. Огюсту Де ла Риву удалось повторить такой опыт перед Женевским научным обществом, это показалось явлением настолько новым, что вплоть до 60-х годов XX столетия некоторые историки приписывали это открытие женевскому физику [1].

После смерти В.В. Петрова его имя было забыто. Целое поколение русских физиков, в том числе изобретатель первой широко распространенной дуговой электрической лампы («электрической свечи») П.Н. Яблоков и изобретатели электросварки и электроплавки металлов Н.Н. Бернадос и Н.Г. Славянов, в течение полувека (1834 – 1886 гг.) ничего не знали о своем выдающемся соотечественнике. И только в 1886 г. был обнаружен главный труд Петрова «Известия о гальвани-вольтовых опытах» (С. Петербург, 1803 г.), который вызвал огромный интерес [2].

После изобретения в 1855 г. немецким конструктором физических приборов Генрихом Гейслером ртут-

ного вакуумного насоса исследования электрического разряда в газе были выполнены немецкими физиками Юлиусом Плюккером и Вильгельмом Гитторфом, исследовавшими, в частности, флюоресценцию стекла трубки, в которой происходит разряд.

Исключительное значение имеют работы профессора Владимира Федоровича Миткевича, действительного члена Академии наук СССР с 1929 г., по исследованию природы электрической дуги, начатые им еще в период его работы в Горном институте и завершенные в лаборатории Политехнического института С.Петербурга. Серия работ В.Ф. Миткевича по изучению свойств электрической дуги, выполненных им в 1902 – 1905 гг., была объединена в монографии «О вольтовой дуге», изданной в 1905 г. В этих классических работах [3], удостоенных в 1907 г. премии им. А.С. Попова, В.Ф. Миткевич исследовал природу давления дуги на анод, установил основную роль испускания электронов катодом в процессе образования и поддержания дуги, исследовал обратную э.д.с. дуги и экспериментально подтвердил результаты Дудделля (1901 г.), определившего эту э.д.с. как разность двух э.д.с. термического характера, возникающих в местах соприкосновения раскаленной газовой среды дуги с концами электродов (при этом более нагретому электроду соответствует большая э.д.с.). В.Ф. Миткевич также выяснил возможность получения дуги при очень малой э.д.с. в цепи в случае дополнительного подогрева катода. Необходимо отметить, что указанные опыты по изучению электрической дуги отличались простотой, изяществом и остроумием.

В случае выключателей высокого напряжения причиной возникновения электрической дуги является замыкание сомкнутых ранее контактов, т. е. дуга возникает за счет напря-

женности электрического поля. Даже при невысоком напряжении, на малом расстоянии между расходящимися контактами напряженность электрического поля будет громадна.

Процесс образования и поддержания электрической дуги между контактами выключателя происходит следующим образом [4]. Под действием интенсивного электрического поля электроны вырываются с поверхности катода и летят по направлению к аноду. При расхождении контактов уменьшается площадь их соприкосновения, благодаря чему увеличивается плотность тока. Это создает местные нагревы и вызывает термическую эмиссию, что и является началом возникновения дугового разряда. При дальнейшем расхождении контактов напряженность электрического поля постепенно уменьшается, и свободные электроны перестают вырываться с поверхности катода под действием поля. Однако поток электронов с поверхности катода не только не уменьшается, но значительно возрастает, что происходит за счет термической эмиссии катода под действием высокой температуры горячей электрической дуги и нагревания катода бомбардирующими его потоками ионов.

Поддержание электрической дуги в газовой (воздушной) среде между электродами возможно только при наличии в дуговом промежутке проводимости, которая появляется вследствие термической ионизации газа (воздуха), находящегося в этом промежутке.

Основная масса свободных электронов и ионов в дуговом пространстве длинной дуги образуется не за счет ионизации толчком, а за счет нагревания этого пространства под действием высокой температуры электрической дуги. Повышение температуры до 2000 – 3000 °К сопровождается сильным увеличением скорости движения атомов и

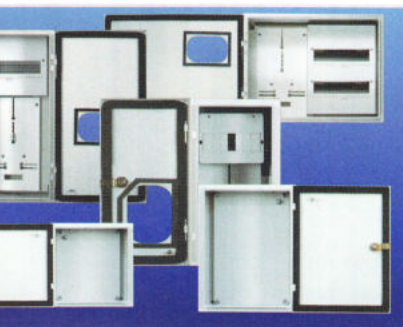
Распределительные и монтажные щиты



металлические распределительные и монтажные щиты типа RL, NRL, IP 30



пластиковые распределительные щиты типа IP 30-44



металлические распределительные щиты типа RH, IP 55



металлические распределительные щиты типа RP, NRP, IP 30

Инпромт

48, Киев-148

Героев Космоса, 4, оф. 702

/факс (044) 407 1376

(044) 407 6525, 407 2042

mail: inpromt@cyfra.net

inpromt.com.ua

молекул. При взаимных столкновениях атомов и молекул газов, нагретых до такой температуры, электронные оболочки атомов и молекул частично разрушаются, образуя ионы и свободные электроны. Термическую причину ионизации дугового пространства установил в 1923 г. американский ученый, профессор Принстонского университета Карл Комптон. При увеличении ионизации дугового пространства ток в дуге возрастает, а при исчезновении ионизации дугового пространства – возрастает электрическая прочность дугового промежутка, т.е. во всякой горячей дуге одновременно с процессом ионизации дугового пространства идет процесс его деионизации.

Применение электрической дуги в технических устройствах, например, в дуговом генераторе электрических токов высокой частоты, поставило вопрос о характеристиках дуги, имеющий для этих устройств существенное значение. Для его выяснения был произведен ряд попыток представить аналитически зависимость между током и напряжением в дуге. Английский ученый Герта Айртон провела исследования электрической дуги постоянного тока, горячей между угольными электродами. В результате своих исследований, опубликованных в 1902 г., Айртон установила зависимость между напряжением, током и длиной дуги и предложила формулу, описывающую рассматриваемый дуговой процесс и показывающую, что он (процесс) имеет падающую вольт-амперную характеристику, т.е. увеличение тока связано с понижением напряжения на электродах. Одновременно с Айртоном такие же исследования проводил американский ученый-электротехник Чарлз Протеус Штейнмец, который предложил свою формулу, описывающую дугу, также горящую между угольными электродами. Проведенные в 1923 г. исследования Ноттингам показали, что выведенные Айртоном и Штейнмцем зависимости правильны только для дуги, горячей между угольными электродами. Для дуги, горячей между металлическими электродами, Ноттингам дал свою, видоизмененную, формулу. Сравнение всех этих трех формул позволило установить тот факт, что формулы Айртон и Штейнмца являются частными случаями формулы Ноттингам. Следует отметить, что все эти исследования

относились только к дуге постоянного тока, горячей в воздухе, и не были пригодны для анализа процесса гашения дуги в жидкостном выключателе.

Первый публичный доклад об исследовательских работах в области масляных выключателей, проводимых фирмой AEG, был сделан 26 мая 1903 г. в Берлине на заседании Электротехнического общества. Было впервые установлено, что разрыв дуги в цепи переменного тока в масляных выключателях происходит в момент перехода тока через нулевое значение и поэтому в случае применения масляного выключателя перенапряжение в отключаемой цепи не наблюдается.

В отношении развития процесса гашения дуги в масляном выключателе долгое время существовала теория, заключающаяся в том, что в момент перехода тока через нулевое значение масло проникает между расходящимися контактами выключателя и создает между ними изолирующую прослойку. Если эта прослойка имеет недостаточное сопротивление, то нарастающее напряжение между расходящимися контактами пробивает ее и происходит повторное зажигание. Этот процесс повторяется при следующем переходе тока через нулевое значение и продолжается до тех пор, пока увеличивающаяся по своей толщине масляная прослойка между электродами не окажется достаточной, чтобы предотвратить новое зажигание дуги.

Более правильный взгляд на процесс гашения дуги в масляном выключателе высказал в 1913 г. немецкий ученый профессор Геттингенского университета А. Симон. Он указал, что дуга гаснет в масляном выключателе не под действием прослойки масла между расходящимися контактами, а под действием массы газов, образующихся вокруг дуги при термическом действии дуги на окружающее масло. Образовавшийся вокруг дуги газовый пузырь, окруженный со всех сторон маслом, подвергается сильному давлению благодаря инерции масла, препятствующей расширению газового пузыря. Так как газы при больших давлениях увеличивают свою электрическую прочность, то это является причиной окончательного гашения дуги в масляном выключателе. Кроме того, образовавшиеся при разложении масла газы содержат в большом количестве водород, что содействует в значительной степени быстрому



охлаждению дугового пространства, так как водород обладает большой теплопроводностью.

Значительный вклад в создание теории дуги и способов ее гашения внес известный американский электротехник доктор Джозеф Слепян. Как известно, электрические дуги подразделяются на короткие и длинные. Обычно короткой называется дуга сравнительно низкого напряжения, в которой преобладающее влияние оказывают процессы, происходящие непосредственно у электродов; расстояние между электродами небольшое (несколько миллиметров). Длинная дуга – это дуга высокого напряжения, в которой преобладающее влияние оказывают процессы, происходящие вне электродов, т.е. в столбе дуги. В 1928 г. Слепян выдвинул гипотезу об околосветовом эффекте, которая позволила объяснить принцип гашения коротких дуг переменного тока в дугогасительной решетке деионного воздушного выключателя [5]. Слепян также в результате своих исследований объяснил процесс гашения длинных дуг переменного тока в ряде дугогасительных устройств и дал рекомендации по применению эффективных способов их гашения. Согласно его данным, длинная дуга успешно гаснет вследствие поперечного или продольного дутья неионизированного газа [6]. Это объяснение имело весьма важное значение, так как позволяло четко формулировать задачи конструкторам. Однако количественных представлений о процессе деионизации эта теория не давала.

В 1930 г. немецкий ученый Ф. Кессельринг предложил эмпирическую формулу, определяющую условия гашения дуги в выключателях. В соответствии с этой формулой необходимо, чтобы спадание температуры происходило быстрее, чем нарастание напряжения (при перерыве дуги во время прохождения тока через нуль), умноженное на коэффициент $K=0,3$ °C/кВ [7]. Теоретически этот закон не поддается обобщению, но зато он хорошо согласуется с практическими данными.

Тепловые процессы оказывают на процессы горения и гашения дуги настолько большое влияние, что были сделаны серьезные попытки создания математической теории дуги, основанной на тепловом балансе и тепловой инерции. Впервые уравнение теплового

баланса устойчиво горящей дуги было предложено в 30-х годах прошлого столетия Дмитрием Аполлинариевичем Рожанским, профессором кафедры физики Харьковского университета (1911 – 1921 гг.) а затем членом-корреспондентом АН СССР с 1933 года. Рожанский указал, что при быстрых изменениях режима дуги напряжение на дуге зависит не только от мгновенного значения тока, но и от скорости его изменения. Как было сказано ранее, дуговой разряд имеет падающую вольт-амперную характеристику, т.е. увеличение тока связано с понижением напряжения на электродах в установившемся состоянии и, соответственно, уменьшение тока приводит к повышению напряжения на электродах. В установившемся состоянии разряда каждой силе тока соответствует определенная площадь катодного пятна и накалившаяся поверхность столба газа, имеющего нужную температуру. Всякое изменение этих величин в сторону их увеличения требует повышения подводимой к дуге мощности, т.е. сопровождается возрастанием напряжения на электродах дуги. Наоборот, при понижении тока избыток тепловой энергии вызывает снижение напряжения или же обеспечивает менее быстрое его нарастание при убывании тока [8]. Используя формальное сходство явления дуги с явлением самоиндукции, Рожанский внес предложение описывать их с помощью кажущейся индуктивности дугового разряда.

На основе баланса энергии немецкий ученый О. Майр в 1943 г. предложил модель дуги переменного тока, позволяющую получить математическое выражение для динамической вольт-амперной характеристики дуги. Однако им был сделан ряд серьезных допущений, идеализирующих процессы в дуге, а именно: учитывалась лишь термоионизация газа, дуга представлялась в виде цилиндра постоянного диаметра, влияние контактов на дугу не учитывалось, т.е. рассматривалась только длинная дуга.

Другой путь исследования характеристики дуги заключался в одновременном снятии осциллографом ее тока и напряжения [9].

В развитии теории дуги и разработке методов ее эффективного гашения принимали участие ученые разных стран, среди которых

значительное место принадлежит советским ученым [10]. Особенно результативным был период 30 – 40 гг. XX столетия. Кроме уже упоминавшегося Д.А. Рожанского, этим вопросом занимались А.Я. Буйлов, Г.В. Буткевич, М.А. Бабилов. Анатолий Яковлевич Буйлов, профессор МЭИ с 1940 г., впервые в 1933 – 1935 гг. исследовал процесс деионизации при высоком напряжении и установил зависимость изменения диэлектрической прочности от скорости восстановления на-пряжения. Профессор Георгий Владимирович Буткевич в период 1929 – 1936 гг. установил температуры дуг переменного и постоянного токов. Д.т.н. М.А. Бабилов в 1934 – 1939 гг. исследовал переходные процессы при изменениях дуги.

В заключение данной части статьи можно привести высказывание доктора Слепьяна: «...разработанная физиками теория незаменима для решения родственных технических проблем и, в свою очередь, инженеры, ставшие физиками, развивают теории» [10].

Литература:

1. Льюис М. История физики / Пер. с итальянского Э.Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1970.
2. История электротехники / Под ред. И.А. Глебова. – М.: Изд-во МЭИ, 1999.
3. Миткевич В.Ф. О вольтовой дуге / В кн.: Избранные труды. – М.-Л.: АН СССР, 1956.
4. Гусев С.А. Очерки по истории развития выключателей переменного тока. – М.: ГЭИ, 1958.
5. Таев И.С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. – М.-Л.: Энергия, 1965.
6. Бабилов М.А. Современные электрические аппараты высокого напряжения. – М.-Л.: ГЭИ, 1950.
7. Кессельринг Ф. Теоретические основы расчета коммутационных аппаратов. – М.-Л.: ГЭИ, 1949.
8. Рожанский Д.А. Физика газового разряда. – М.-Л. ОНТИ, 1937.
9. Капцов Н.А. Физические явления в вакууме и разреженных газах. – М.-Л.: ГТИ, 1933.
10. Слепян Дж. Некоторые физические проблемы электроэнергетики / Пер. с англ. А.Л. Комаровой. – УФН, т. XXII, 1939, вып. 2.

(Продолжение следует)