



Электромеханика и машиностроение

УДК 658.392.2:656.2

МЕТОДИКА ОПЫТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙСЯ ПРОЧНОСТИ

С.М.АПОЛЛОНСКИЙ¹, Ю.В.КУКЛЕВ²

¹ ООО «Элетромеханотроника», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Институт энергетики и транспортных систем, Санкт-Петербург, Россия

Основные требования, которые предъявляются к электрическому аппарату при проектировании, разработке, изготовлении и эксплуатации, заложены в технических условиях (ТУ) и в нормативных документах (ГОСТ). Электрический аппарат должен работать в соответствии с конкретным назначением и обладать достаточной надежностью, живучестью и безопасностью.

Надежность и живучесть электрического аппарата в значительной степени зависят от скорости роста восстанавливающейся прочности, под которой понимают процесс роста пробивного напряжения в дуговом промежутке для исключения повторного зажигания дуги.

В статье рассмотрены некоторые методы опытного определения восстанавливающейся прочности, которые выполнены на специальных лабораторных установках. Они описываются применительно к условиям измерения прочности остаточного столба дуги переменного тока за его переходом через нулевое значение тока и могут быть использованы при проектировании дугогасительных устройств аппаратов низкого напряжения.

Ключевые слова: аппараты низкого напряжения, дугогасительные устройства, восстанавливающаяся прочность, прочность остаточного столба дуги, переменный ток

Как цитировать эту статью: Аполлонский С.М. Методика опытного определения восстанавливающейся прочности / С.М.Аполлонский, Ю.В.Куклев // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 235-239. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.235

Введение. При разработке электрических и электронных аппаратов необходимо, прежде всего, учитывать предписанную им коммутационную способность, которая накладывает определенные функционально-технические требования.

К основным требованиям относятся:

- допустимая температура при длительном нагреве;
- электродинамическая стойкость при токах короткого замыкания;
- термостойкость аппарата при токах короткого замыкания;
- коммутационная износостойкость, соответствующая ресурсу данного типа аппарата;
- технологичность конструкции.

Выполнение этих требований является одной из причин существования разнообразных типов электрических аппаратов.

Надежность электрических аппаратов обусловлена уровнем проектирования их узлов. К основным узлам электрических аппаратов относятся:

- контактная система, содержащая коммутационный орган;
- дугогасительное устройство;
- привод (электромагнитный механизм);
- внешнее магнитное дутье.

Последний узел имеется не у всех аппаратов.

Оценка надежности аппарата иногда затруднена из-за отсутствия информации о характеристиках работы данного узла. В этом случае строится физическая модель и проводятся дополнительные испытания, отличные от испытаний опытных образцов. Дополнительные испытания увеличивают экономические затраты, поэтому необходима оценка целесообразности таких испытаний.

С целью снижения затрат на дополнительные испытания строятся математические модели, которые позволяют провести анализ работы узла. Однако математическое моделирование узлов затруднено из-за сложности физических процессов, происходящих в электрических аппаратах. В качестве примера можно рассмотреть процессы, сопровождающиеся при переходе тока через нуль электрической дуги в коммутационных аппаратах. При опережении роста сетевого напряжения в контактном растворе над восстанавливающейся прочностью может воз-

никнуть повторное зажигание дуги, что ускоряет износ контактов [1]. Кроме того, при больших токах электрическая дуга более плотно прилегает к изоляционной стенке аппарата. Неравномерный нагрев изоляционной стенки сопровождается появлением внутри нее механического напряжения, которое приводит к деформации дугогасительной камеры и к преждевременному ее износу. Исследование таких механических напряжений представляет интерес с точки зрения разрушения стенки камеры. Трудность этих исследований заключается в малых деформациях и поверхности их воздействия.

Влияние этих процессов на надежность функционирования аппаратов можно снизить с помощью разработок вакуумных изделий. Резкое снижение концентрации газовых частиц уменьшает возможность возникновения носителей тока (электронов и ионов). В результате пробивные напряжения промежутков в вакууме повышаются в 4-5 раз в сравнении с воздухом при атмосферном давлении. Основная часть носителей электричества поставляется из металлического катода за счет эмиссии электронов. При прекращении эмиссии, например при прохождении переменного тока через нуль, возможность для переноса тока исчезает и цепь отключается [2, 4].

Два рассмотренных процесса, проходящих при отключении, относятся и к бесконтактным электрическим аппаратам. В этом случае электромагнитная энергия преобразуется не в тепловую, а в емкостную энергию.

Индукция внешнего и собственного магнитного поля, создающая магнитное дутье, должна способствовать быстрому сходу дуги с контактов, особенно в последней фазе гашения дуги, для того чтобы перенапряжения в цепи не превышали допустимые для обмотки возбуждения защищаемых электрических машин. В связи с этим стали применять гибридные аппараты, в частности для токов свыше 25 А.

В технике эксперимента не существует методов непосредственного измерения восстанавливающейся прочности. Она определяется по напряжению, которое пробивает промежуток в условиях опыта. Необходимость подавать измерительное напряжение неизбежно приводит к искажению условий в газоразрядном канале за счет энергии, которая выделится в нем под воздействием этого напряжения. Поэтому любой метод измерения позволяет определить восстанавливающуюся прочность, которая в той или иной мере отлична от так называемой «холодной прочности», свойственной промежутку, предоставленному самому себе, когда к нему не приложено внешнее напряжение. Степень отличия измеренной величины от «холодной прочности» определяется особенностями метода измерения.

Рассмотрим некоторые методы опытного определения восстанавливающейся прочности, которые применимы к условиям дугогасительных устройств аппаратов низкого напряжения. Обычно эти методы позволяют определить в одном опыте лишь одну точку кривой восстанавливающейся прочности.

Излагаемые методы описываются применительно к условиям измерения прочности остаточного столба дуги постоянного и переменного тока при его переходе через нулевое значение.

Восстанавливающаяся прочность столба свободной дуги постоянного тока. В момент времени t дуговой промежуток из проводника превращается в диэлектрик и одновременно растет напряжение на нем (индуктивность уменьшает нулевую паузу и способствует горению дуги).

Если нарастание сопротивления дугового промежутка тока, выраженное его пробивным напряжением $u_{пр}$ (кривая 1), будет опережать нарастание восстанавливающегося напряжения u на промежутке (кривая 2), то дуга погаснет при переходе тока через нуль (рис.1).

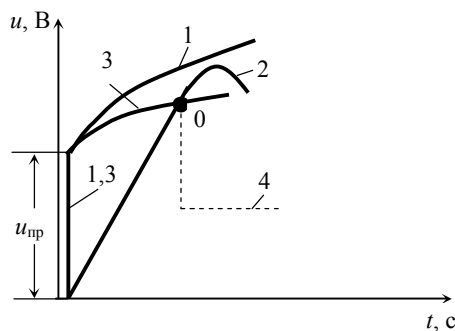


Рис.1. Условия гашения дуги переменного тока

Если же нарастание сопротивления промежутка будет медленным (кривая 3), то в момент времени, соответствующий точке 0, произойдет повторное зажигание дуги, и напряжение на дуге изменится (кривая 4).

Как правило, электрическая прочность дугового промежутка вначале растет быстрее, а затем ее рост замедляется. Судя по опытам, с момента исчезновения тока в дуге околокатодное пространство почти мгновенно приобретает электрическую прочность порядка 150-250 В. Это объясняется наличием объемных



зарядов у катода (электроны уйдут в анод и объемного отрицательного заряда у анода не будет). У катода образуется положительный объемный заряд из малоподвижных ионов, и пространство у катода становится свободным от электронов. При долго горящей дуге электроды сильно разогреваются, и это существенно снижает величину электрической прочности промежутка у катода, и она может составлять всего несколько десятков вольт.

Для аппаратов постоянного тока такими методами можно считать:

- Метод критических режимов: в отключаемой цепи создаются условия, которые называют критическими, при которых прекращаются повторные зажигания дуги. Они создаются регулировкой скорости восстановления напряжения на промежутке [4].

- Создание специальных условий для горения дуги:

- а) в отключаемой цепи должны быть определенные условия, при которых дуга устойчиво горит в течение нескольких полупериодов. При этом фиксируется осциллограмма восстанавливающегося напряжения с хорошей разверткой процесса во времени [5];

- б) используется метод с применением импульсных схем. Через определенный интервал времени после перехода тока через нуль синхронизирующее устройство отключает источник питания и подает на промежуток импульс напряжения такой величины, который достаточен для пробоя. Задавая разную величину импульса напряжения и регулируя момент его приложения к промежутку, определяют точки кривой восстанавливающейся прочности. Импульсы напряжения от схемы можно регулярно подавать через заданные интервалы времени, и тогда будут в одном опыте найдены по осциллограмме не одна, а несколько точек непрерывной кривой восстанавливающейся прочности.

Методами а) и б) измерения восстанавливающейся прочности нельзя записать непрерывную кривую восстанавливающейся прочности в условиях одного опыта. В условиях такого опыта они позволяют определить лишь одну точку этой кривой. Построенная по нескольким таким точкам кривая может представлять лишь условную кривую восстанавливающейся прочности, так как процесс восстановления прочности в одном опыте может отличаться от соответствующего процесса в другом опыте и в величине прочности может наблюдаться некоторый разброс. Если желательно получить несколько точек для построения кривой восстанавливающейся прочности, то необходимо модифицировать опыт так, чтобы снимать ряд точек одновременным гашением дуги в этом же количестве разрывов, включаемых последовательно в цепь главного тока.

Анализируя методы построения кривой восстанавливающейся прочности в низковольтных аппаратах постоянного тока следует отметить важный фактор: моменты перехода через нуль тока и напряжения дуги совпадают. Незначительные отклонения во времени могут быть только за счет индуктивности плазмы газового разряда.

Восстанавливающаяся прочность столба свободной дуги переменного тока. Несколько иначе дело обстоит в дугогасительных устройствах аппаратов управления переменного тока [2, 5].

Свободная дуга возникает при отключении цепи, когда в аппарате не используются какие-либо способы усиления интенсивности охлаждения дугового столба. В такой дуге наблюдается естественный теплообмен между нагретым газом и окружающей средой – воздухом при нормальных атмосферных условиях. При отключаемых низких значениях токов (5–128 А) благодаря значительным электродинамическим силам дуга достаточно быстро выдувается с контактов и растягивается в зоне за контактами. Как показал анализ результатов исследований [3, 5], это приводит к существенному снижению восстанавливающейся прочности. При средних ($I \leq 3000$ А) и больших токах ($I \gg 3000$ А) происходит значительный рост восстанавливающейся прочности промежутка.

Зависимость восстанавливающейся прочности для свободной дуги от времени в пределах от 15–20 до 200–300 мкс может быть выражена приближенной формулой [5]:

$$u_{в.п} = U_{в.п}^0 + K_{\Sigma} t,$$

где $U_{в.п}^0$ – начальная восстанавливающаяся прочность в указанном выше условном понимании этой величины, В; K_{Σ} – скорость роста прочности, В/мкс.

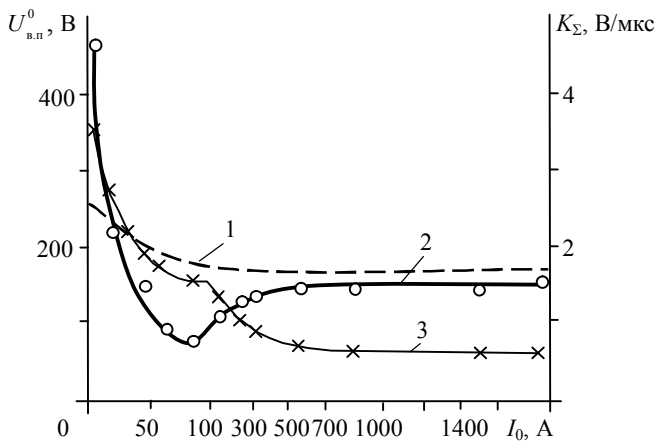


Рис.2. Зависимости начальной восстанавливающейся прочности и скорости роста прочности от отключаемого тока (свободная дуга, медные контакты)

1 – околочатодное напряжение; 2 – $K_{\Sigma} = f(I_0)$; 3 – $U_{в.п}^0 = f(I_0)$

Зависимости $U_{в.п}^0 = f(I_0)$ и $K_{\Sigma} = f(I_0)$ получены из результатов эксперимента (рис.2).

Найденная по приведенной формуле восстанавливающаяся прочность будет минимальной для рассматриваемых условий ее восстановления.

Начиная с тока более 100 А заметно влияние электродинамических сил. Дуга уже быстро выходит на верхние «концы» рычажных контактов, в своем движении она уже не будет ограничена. Условия охлаждения дуги улучшатся, и поскольку она более подвижная, вызовет также некоторое перемещение ее основания. Это способствует улучшению условий восстановления прочности и приводит к некоторому ее росту. Действительно, начиная с указанных величин тока, кривая $K_{\Sigma} = f(I_0)$ имеет возрастающий

характер, а кривая $U_{в.п}^0 = f(I_0)$ снижается менее круто. Справедливость этих суждений подтверждается тем, что минимум в кривой $K_{\Sigma} = f(I_0)$ совпадает с максимумом в общеизвестной зависимости времени горения свободной дуги от тока. На восстанавливающуюся прочность должны оказывать влияние потоки плазмы, которые могут выносить энергию из околочатодных зон. В проведенных исследованиях это влияние учитывалось в интегральном виде. Однако было бы целесообразно провести специальные исследования с целью изучения влияния направления, скорости и интенсивности потоков плазмы на восстанавливающуюся прочность.

Важным результатом исследования является то, что электрическая прочность непосредственно за переходом тока через нуль $U_{в.п}^0$ оказалась существенно ниже значений так называемой околочатодной прочности [7].

Разница в полученных результатах по «начальной» восстанавливающейся прочности объясняется разной степенью термоэлектронной эмиссии с нагретых электродов после нуля тока в условиях тех и других опытов. Если рассматривать непрерывную кривую восстанавливающейся прочности, то принципиально можно ожидать наличия в ней трех зон.

Первая зона должна следовать непосредственно за переходом тока через нуль. Ее характеристики должны, очевидно, определяться процессами охлаждения оснований дуги до температуры, при которой прекратится термоэлектронная эмиссия с них.

Второй зоне должна соответствовать стадия охлаждения прикатодной зоны, а затем и всего столба дуги до температуры ниже 3000 К, когда прекратится термическая ионизация воздуха и исчезнет влияние ионизированных частиц газа на восстанавливающуюся прочность.

В третьей зоне произойдет окончательное восстановление диэлектрических свойств газа; восстанавливающаяся прочность будет определяться температурой газа лишь через изменение его плотности ($3000 \text{ К} > T > T_{\text{окр.среды}}$). Если согласиться с таким делением кривой восстанавливающейся прочности на зоны, то можно утверждать, что измеренные значения $u_{в.п}$ относятся, в основном, ко второй зоне и лишь иногда – к первой, преимущественно к ее концу.

Изложенные результаты исследования восстанавливающейся прочности относятся к времени, следующему непосредственно за первым переходом тока через нулевое значение. Дальнейшие исследования не представляют интереса, ибо рациональное дугогасительное устройство должно обеспечивать гашение дуги в первый же переход тока через нуль. Поэтому важны, прежде всего, зависимости, относящиеся к первому переходу.

Анализ результатов эксперимента. Момент размыкания контактов аппарата относительно синусоиды тока влияет на процесс восстановления прочности промежутка и ее величину. На основании статистических данных, полученных при опытах, можно сделать вывод о том, что при токах до нескольких сотен ампер наиболее неблагоприятным является момент размыкания контактов, близкий к середине полупериода, когда условия гашения дуги оказываются наиболее тяжелыми, а количество повторных зажигания дуги – наиболее высоким [8].



Этот факт можно объяснить тем, что при размыкании контактов в конце полупериода тока, при подходе синусоиды тока к нулю в дуге и ее основаниях на контактах выделяется относительно мало энергии. Это ведет к улучшению условий восстановления электрической прочности вследствие сравнительно быстрого охлаждения соответствующей зоны газоразрядного канала за переходом тока через нуль. При размыкании контактов в начале полупериода тока достигается надежное растягивание дуги вследствие электродинамических сил и расхождения контактов аппарата: дуга выходит из узкой зоны между контактами, ее основания могут свободно перемещаться по ним. Тогда условия восстановления электрической прочности становятся также благоприятными, за переходом через нуль она нарастает сравнительно быстро и относительное количество повторных зажиганий уменьшается.

Если контакты аппарата расходятся в середине полупериода тока, то к концу полупериода дуга не успевает выйти из узкой зоны между контактами и в то же время в ней уже накапливается относительно много энергии. За переходом через нуль нет благоприятных условий для сравнительно быстрого ее рассеивания, поэтому восстанавливающаяся прочность недостаточно высокая и количество повторных зажиганий дуги более высокое, чем в двух других рассмотренных выше случаях [4].

Если обратиться к абсолютным значениям восстанавливающейся прочности при значительных отключаемых токах, то можно констатировать, что они невысоки, по крайней мере, они недостаточны, чтобы выдержать восстанавливающиеся напряжения в сотни и даже тысячи вольт, которые возможны в сетях низкого напряжения. Возникает вопрос, какие факторы в таких условиях обеспечивают погасание дуги в несколько сотых долей секунды?

Выводы

1. Возникающая на контактах аппарата электрическая дуга при своем растяжении приобретает значительное активное сопротивление, которое может оказаться почти на порядок выше величины сопротивления отключаемой цепи.
2. Это обстоятельство ведет к существенному уменьшению величины напряжения источника в момент перехода тока через нуль.
3. В результате восстанавливающееся напряжение резко снижается и относительно невысокая восстанавливающаяся прочность промежутка будет в состоянии выдержать его без пробоя.
4. Возрастающее сопротивление дуги существенно снижает величину тока в цепи в последующие полупериоды горения дуги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аполлонский С.М. Физические процессы в электрических аппаратах. Т.1. Тепловые и электромеханические процессы в электрических аппаратах / С.М.Аполлонский, Ю.В.Куклев. Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2012. 678 с.
2. Аполлонский С.М. Физические процессы в электрических аппаратах. Т.2. Дугогасительные устройства и проблемы совместимости электрических аппаратов / С.М.Аполлонский, Ю.В.Куклев. Saarbrücken (Germany): Palmarium Academic Publishing, 2012. 476 с.
3. Аполлонский С.М. Низковольтные электрические аппараты /С.М.Аполлонский, Ю.В.Куклев // Записки Горного института. 2016. Т.218. С. 251-260.
4. Таев И.С. Исследование закономерностей восстановления электрической прочности в дугогасительных устройствах аппаратов управления переменного тока: Автореф. ... д-ра техн. наук / МЭИ. М., 1967. 40 с.
5. Таев И.С. Электрические аппараты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. М.: Энергия, 1973. 423 с.
6. Электрические и электронные аппараты / Е.Г.Акимов, А.П.Бурман, В.Г.Дегтярев и др. Под ред. Ю.К.Розанова. М.: Информэлектро, 2001. 417 с.
7. Esser W., Systemschutze D. Die neu Schutz-generation // Krockner-Moeller-Post. 1985. Vol. 48. N 98. P. 42-47.
8. Dan A.M. Low-Power Harmonic Impedance Meter // International Conference on Harmonics in Power Systems, 16 October 1984. P. 189-193.

Авторы: С.М.Аполлонский, д-р техн. наук, профессор, smapol@yandex.ru (ООО «Электромеханотроника», Санкт-Петербург, Россия), Ю.В.Куклев, канд. техн. наук, доцент, smapol@yandex.ru (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Институт энергетики и транспортных систем, Санкт-Петербург, Россия).
Статья принята к публикации 11.04.2016