

Надежность работы ограничителей перенапряжений (ОПН) – важная проблема в области защиты промышленного оборудования. Для контроля стабильности свойств ОПН и их способности противостоять эксплуатационным воздействиям разработаны и включены в национальный и международный стандарты методики испытаний, необходимые на разных стадиях конструирования, постановки на производство и серийного выпуска данных аппаратов. На стадии эксплуатации минимально необходимый объем испытаний оговорен действующими нормативами, в частности РД «Объем и нормы испытаний электрооборудования», предусмотрено проведение периодического контроля свойств ОПН в процессе эксплуатации.

Чтобы оценить эффективность применения существующих средств диагностики, необходимо понимать, какие факторы, воздействующие на ОПН в процессе эксплуатации, приводят к заметным или критическим изменениям основных характеристик варисторов. Один из таких факторов – «старение» варисторов – рассматривают в своем материале наши петербургские авторы Виктор Львович Дмитриев и Марианна Анатольевна Красавина.

ВАРИСТОРЫ ДЛЯ ОПН «Старение» в процессе эксплуатации

На электротехническом рынке сейчас появилось достаточно много новых устройств, предназначенных, по замыслу их разработчиков, для оценки состояния и работоспособности ограничителей перенапряжений в процессе эксплуатации. Это всевозможные счетчики числа срабатываний ОПН, средства измерения тока, протекающего через ОПН при воздействии рабочего напряжения, это, наконец, системы тепловизионного обследования состояния аппаратов. Большинство этих устройств традиционно нацелено на выявление опасных изменений свойств варисторов в процессе эксплуатации.

В последние 10–15 лет изменения свойств варисторов под действием эксплуатационных факторов изучались преимущественно зарубежными специалистами. Свертывание таких исследований, проводившихся ранее в нашей стране в ВЭИ, на Корниловском фарфоровом заводе и ряде других предприятий, было связано как с финансовыми трудностями, так и с тем, что отечественная промышленность, за исключением нескольких изготовителей, выпуск варисторов практически прекратила. Поскольку подавляющее большинство российских производителей используют для комплектации ОПН варисторы, закупаемые у сторонних, обычно зарубежных, организаций, особого интереса к проведению таких дорогостоящих исследований они не испытывают.

Основное внимание в опубликованных результатах исследований последних лет было сосредоточено на выявлении изменений свойств варисторов, подвергавшихся воздействию импульсов тока. Ниже приведены некоторые результаты таких исследований, опубликованные в зарубежной периодической печати и в материалах международных конференций и поэтому не всегда доступные для широкого круга заинтересованных лиц.

ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Результаты исследования стабильности характеристик варисторов при воздействии импульсов тока показывают, что степень изменения вольт-амперных характеристик варисторов зависит от максимальных значений, числа и частоты воздействий импульсов тока.

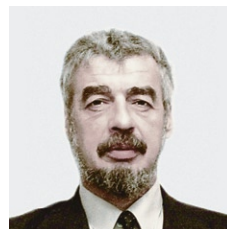
В качестве примера на рис. 1 из [1] показана типичная зависимость изменений вольт-амперной характеристики варисторов в области напряжений, близких к наибольшему допустимому напряжению для варистора, от максимального

значения, количества и формы воздействовавших импульсов. Из приведенных на рис. 1 зависимостей видно, что для достижения тех же изменений в вольт-амперной характеристике варистора при уменьшенной вдвое амплитуде прикладываемого импульса тока требуется на порядок увеличить число воздействий.

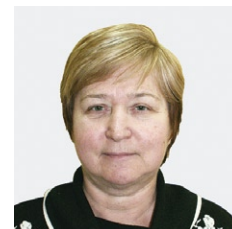
Если длительность и максимальное значение воздействующих импульсов тока сопоставимы или меньше соответствующих нормированных значений, то даже после воздействия сотен и тысяч импульсов изменения в вольт-амперной характеристике не превышают 5–10%. Следует отметить, что такой результат наблюдался в тех случаях, когда варисторы подвергались воздействию единичных импульсов тока, а в промежутках между импульсами варисторы находились под действием наибольшего рабочего напряжения промышленной частоты.

Отсутствие напряжения промышленной частоты в интервалах между импульсами тока, сокращение интервала времени между приложениями импульсов, их приложение не одиночными воздействиями, а сериями из нескольких импульсов, увеличение длительности или максимального значения импульсов тока приводят к более значительным изменениям в вольт-амперной характеристике варисторов. Изменению подвергается преимущественно резистивная (активная) составляющая тока проводимости, как показано на рис. 2. Это означает, что защитные функции варистора в области грозовых и коммутационных перенапряжений остаются практически неизменными.

Существенное влияние на изменения в вольт-амперной характеристике оказывает частота приложения импульсов. В [2] приведены результаты исследований и сопоставления изменений характеристик при приложении к варисторам одиночных импульсов тока (SP) и серий импульсов (MP) с межимпульсным интервалом в серии от 25 до 100 мс. Показано, что при воздействии серии импульсов тока, в отличие от воздействия одиночных импульсов, остающееся напряжение на варисторе при каждом последующем импульсе возрастает. При параметрах импульса тока, приведенных на рис. 3, остающееся напряжение на варисторе при воздействии шестого импульса в серии увеличилось на 10%, но к началу следующей серии остающееся напряжение возвращается к тому же значению, что и при первом импульсе первой серии, даже при подогретых или предварительно нагруженных варисторах.



Виктор Дмитриев,
заместитель директора
по научной работе



Марианна Красавина,
к.т.н., технический
директор

ЗАО «Завод энергозащитных устройств»,
г. Санкт-Петербург

Рис. 1. Влияние числа воздействовавших импульсов тока нормированных форм на вольт-амперную характеристику варисторов

$\Delta V_{0,1\text{мА}}$ и $\Delta V_{1\text{мА}}$ – изменения (в процентах от начального значения) величин напряжения промышленной частоты (при резистивной составляющей тока через варистор соответственно 0,1 и 1 мА), вызванные приложением соответствующего числа указанных импульсов тока.

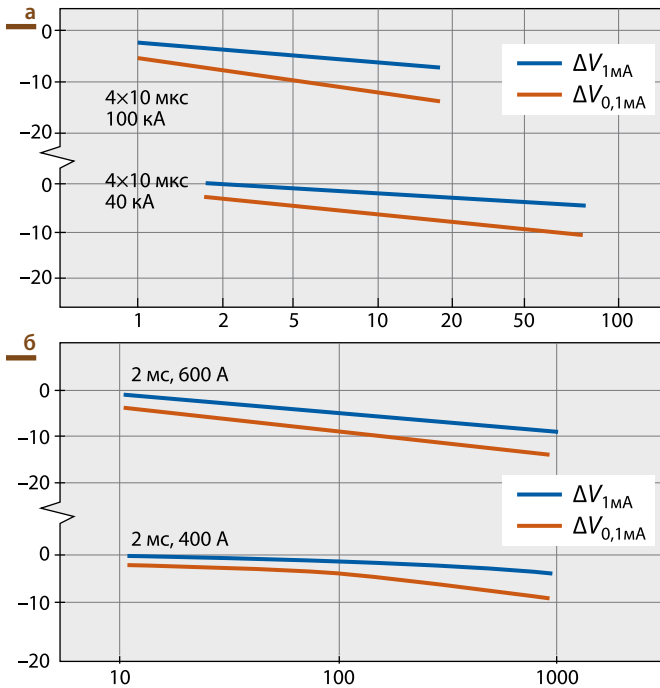
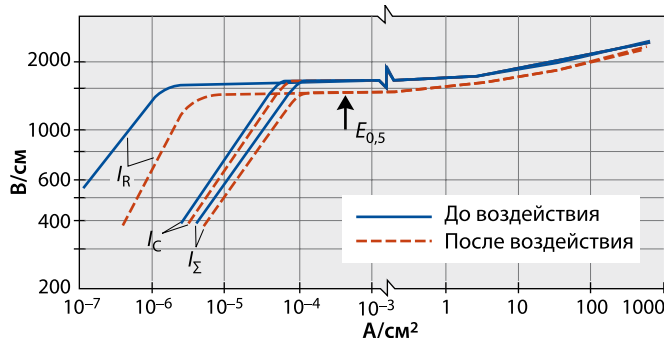


Рис. 2. Изменения вольт-амперной характеристики варистора вследствие импульсных воздействий



I_{Σ} – полный ток через варистор; I_C и I_R – соответственно емкостная и резистивная составляющие полного тока [1]; $E_{0,5}$ – напряжение на варисторе при токе 0,5 мА.

Рис. 3. Изменение остающегося напряжения на варисторе при приложении серии из 6 импульсов тока 8/20 мкс с максимальным значением 15 кА [2]

Интервал времени между импульсами показан сокращенным.

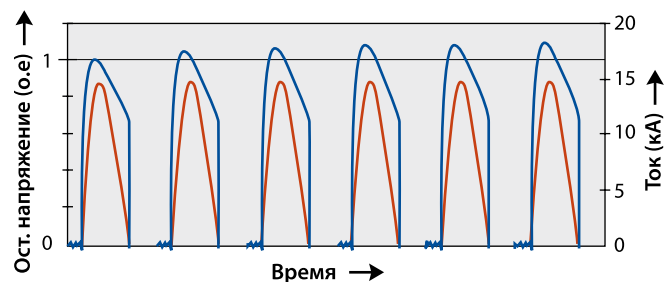


Рис. 4. Изменение резистивной составляющей тока через варистор, находящийся под действием наибольшего рабочего напряжения при температуре 115°C после приложения двух импульсов тока [2]

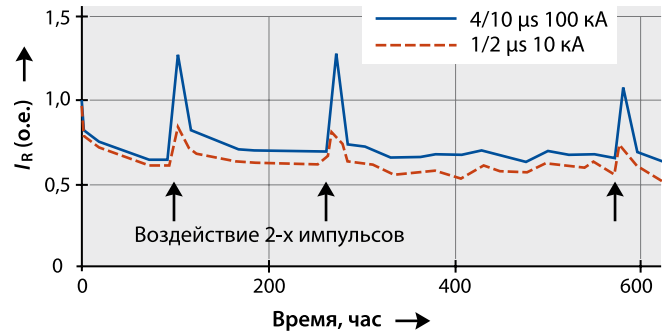
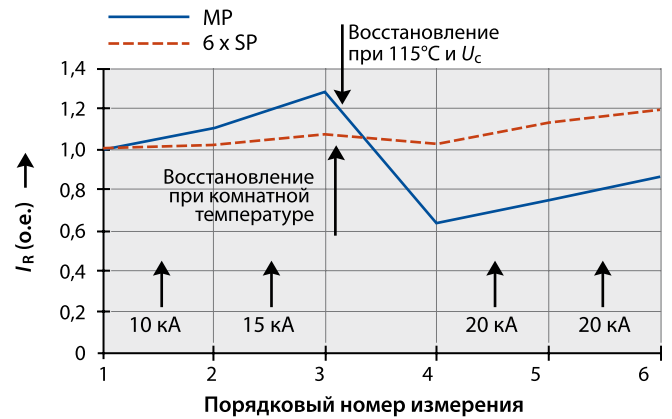


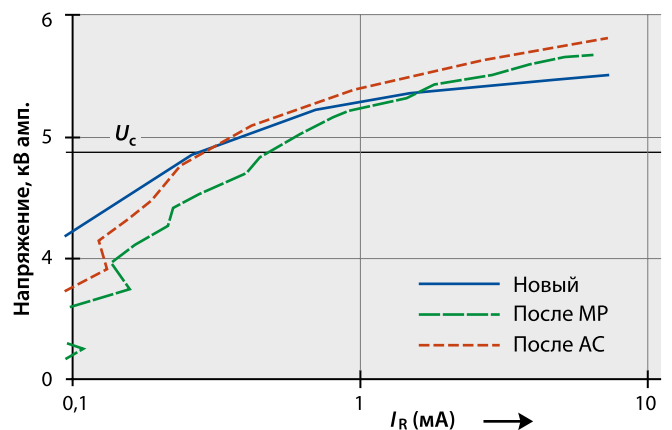
Рис. 5. Изменение резистивной составляющей тока проводимости после воздействия импульсов тока на варисторы с последующим приложением (при комнатной и повышенной температурах) рабочего напряжения промышленной частоты [2]



MP – воздействие серии из 6 импульсов тока с интервалом между сериями от 20 до 100 мс;
 SP – воздействие из 6 отдельных импульсов тока [2];
 U_C – наибольшее рабочее напряжение варистора.

Рис. 6. Вольт-амперная характеристика (для резистивной составляющей тока)

- нового варистора с номинальным разрядным током 5 кА;
- этого же варистора после воздействия трех серий по 6 импульсов в каждой 8/20 мкс с максимальным значением тока 18 кА;
- этого же варистора, выдержанного в течение 72 ч при 115°C под действием наибольшего рабочего напряжения промышленной частоты АС [2].



Как видно из рис. 4, большее импульсное воздействие приводит к большему изменению резистивной составляющей тока. Наличие рабочего напряжения промышленной частоты, приложенного к ОПН после импульсных воздействий, может приводить к уменьшению резистивной составляющей тока проводимости, как показано на рис. 4, 5 и 6. В отсутствие приложенного рабочего напряжения промышленной частоты уменьшение резистивной составляющей тока не наблюдается. Воздействие серии из 6 импульсов вызывает заметно большее увеличение резистивной составляющей, чем просто 6 одиночных импульсов.

Деградация характеристик варисторов, вызванная прохождением импульсов тока, обратима (может быть, в течение нескольких лет) при условии воздействия на варисторы рабочего напряжения промышленной частоты. В отсутствие воздействия напряжения промышленной частоты восстановление свойств варисторов не наблюдается.

Из всего сказанного выше, в частности, следует, что применение счетчиков импульсов, фиксирующих лишь общее число импульсов тока, прошедших через ОПН, но не фиксирующих частоту появления и ампер-временные характеристики этих импульсов тока, практически не дает сколько-нибудь полезной информации для оценки возможных изменений характеристик ограничителя перенапряжений. Так, один из счетчиков, выпускаемых отечественным производителем, обеспечивает фиксацию импульсов при минимальных значениях амплитуды: грозового тока 8/20 мкс – 2,4 кА, коммутационного тока 30/60 мкс – 850 А и импульса 4/10 мкс – 5,4 кА. Зафиксированные таким счетчиком 20 воздействий импульсов тока на ОПН за 1 год могут означать с равным успехом, что через аппарат прошло 20 грозовых импульсов тока с амплитудой 5 кА либо что ОПН подвергся воздействию 20 импульсов тока 4/10 мкс с амплитудой 100 кА. Показания счетчика в обоих случаях будут одинаковы, а последствия таких воздействий для ОПН будут существенно отличаться (см. рис. 1).

Отметим, что исследования [1, 2] проводились на различных типах варисторов многих производителей. Именно поэтому на графиках отсутствуют конкретные численные значения. Ценность приведенных зависимостей состоит в том, что такое поведение варисторов типично.

Появление усовершенствованных технологий и рецептов изготовления варисторов может уменьшить деградацию варисторов, но не изменит принципиально ход зависимостей, как не изменилась принципиально вольт-амперная характеристика варисторов за всё время их разработки.

ДЕЙСТВИЕ РАБОЧЕГО НАПЯЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В каждой новой конструкции ОПН стабильность вольт-амперной характеристики варисторов под воздействием эксплуатационных факторов проверяют в процессе типовых испытаний по методикам, изложенным в стандартах [3, 4].

В процессе типовых испытаний проверяются заявляемые изготовителем защитные характеристики ОПН, его пропускная способность, характеристика «напряжение–время», проводятся так называемые рабочие испытания, а также ряд других. Эти стандартизированные процедуры достаточно подробно описаны в [3, 4], и смысла останавливаться на них не было бы, если бы не одно маленькое «но», связанное с терминологией, используемой в процедурах рабочих испытаний.

Перед проведением рабочих испытаний и определением характеристики «напряжение–время» необходимо уточнить значения прикладываемых напряжений. Поправочные коэффициенты к напряжениям определяются с использованием вспомогательной процедуры, известной как испытание на ускоренное старение (п. 9.5.3 ГОСТ Р 52725).

Алгоритм введения поправочных коэффициентов определяется тем, увеличилась или нет мощность активных потерь в варисторах за время испытаний на ускоренное старение по сравнению с начальным состоянием.

1. Если мощность потерь уменьшилась, то образцы ОПН для проведения рабочих испытаний и определения характеристики «напряжение–время» должны быть скомплектованы из новых варисторов.
2. Если мощность потерь увеличилась, то образцы ОПН для проведения этих испытаний могут быть собраны:

- или из новых варисторов (тогда испытательные напряжения корректируют с учетом результатов испытаний на ускоренное старение);

- или из варисторов, прошедших испытание на ускоренное старение (тогда корректировка испытательных напряжений не производится, а варисторы, использованные для комплектовки образцов, называются состаренными).

Следует обратить внимание, что изменение мощности потерь в варисторах, полученное при испытаниях на ускоренное старение, в условиях реальной эксплуатации ОПН при рабочей температуре 20°C будет наблюдаться только через 100 лет.

Из текстов национального и международного стандартов очевидно, что процедура испытаний на старение не имеет самостоятельного значения, а результаты испытаний не используются в качестве браковочного критерия. Это лишь вспомогательная процедура, которая необходима для уточнения процедуры непосредственно рабочих испытаний и определения характеристики «напряжение–время». Критерием соответствия варисторов требованиям стандартов являются те или иные результаты испытаний на ускоренное старение, а успешность проведения рабочих испытаний и определения характеристики «напряжение–время».

Во избежание недоразумений, в [3] прямо указано: «Состаренные варисторы по определению – варисторы, испытанные согласно п. 9.5.3» (аналогичное примечание имеется и в [4]).

К сожалению, в последние годы всё шире стали говорить об ОПН, собранных с использованием «нестарящихся» варисторов, имея в виду варисторы, у которых в процессе испытаний на ускоренное старение мощность потерь уменьшилась. Вопрос использования в литературе терминов «старящиеся» – «нестарящиеся» не так безобиден, как это кажется с первого взгляда. Действительно, если забыть про связь с термином «состаренные», введенным в упомянутых стандартах, а основываться только на интуитивном понимании термина «нестарящиеся варисторы», то с аппаратом, собранным из таких варисторов, ничего случиться не может, поскольку колонка варисторов не старится несмотря ни на что, а значит, не изменяет своих свойств в процессе эксплуатации.

Однако, как нетрудно понять, само по себе использование варисторов, показавших тенденцию к уменьшению мощности потерь в процессе испытаний на ускоренное старение при воздействии рекомендованного изготовителем напряжения, еще не говорит о том, что в конструкции ОПН отсутствуют ошибки и такой эффект сохранится при использовании варисторов в конкретном типе ОПН. Проиллюстрируем это.

Изготовители варисторов всегда указывают величину наибольшего (длительного допустимого) напряжения промышленной частоты для своей продукции. Так, для наиболее известных в нашей стране варисторов Ерсос фирма установила конкретное соотношение для каждого типа варисторов между указываемым на каждом варисторе остающимся напряжением при импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой 10 кА и допустимым для этого варистора наибольшим рабочим напряжением. При выбранном таким образом испытательном напряжении для процедуры ускоренного старения, в варисторах типа E78SR123E мощность активных потерь за время испытаний уменьшается до величины 0,8–0,82 от первоначального значения, что многократно проверено во многих лабораториях, в том числе и при испытаниях в НИИПТ.

Результаты испытаний на ускоренное старение варисторов Ерсос при рекомендованном изготовителем напряжении широко известны. Менее известны потребителям ограничителей перенапряжений результаты испытаний этих же варисторов как элемента ограничителя перенапряжений с учетом требуемых [3, 4] поправок. Так, если увеличить испытательное напряжение сверх рекомендованного изготовителем на 5% для учета неравномерности распределения напряжения на варисторах по высоте ОПН (согласно процедуре испытаний, приведенной в стандартах), то мощность потерь к концу цикла испытаний для этого же типа варисторов составляет уже 0,9–0,98 от первоначального (испытания НИИПТ, 2002 г.). Проведение таких испытаний будет действительно актуальным до тех пор, пока существуют изготовители ОПН, использующие для комплектации варисторы фирмы Ерсос с заявляемыми защитными характеристиками аппаратов лучшими, чем известные характеристики единичных варисторов фирмы Ерсос,

Дальнейшее незначительное увеличение приложенного напряжения приводит к тому, что за время испытаний мощность активных потерь в варисторе уже не уменьшается, а начинает возрастать по сравнению с первоначальным значением. Очевидно, что если изготовитель ОПН ошибся в оценке неравномерности распределения напряжения вдоль колонки варисторов, часть варисторов окажется под воздействием напряжения, превышающего наибольшее допустимое для них. С учетом сказанного, превышение действующего напряжения над наибольшим допустимым приводит к тому, что «нестаряющиеся» варисторы в конкретной конструкции ОПН будут стариться.

Однако еще раз повторим, что пристальное внимание к результатам вспомогательных испытаний на ускоренное старение представляется неоправданным.

Косвенным подтверждением этого утверждения является многолетний опыт работы ОПН с наибольшим рабочим напряжением 73 кВ, изготовленных Корниловским заводом (увеличение мощности потерь в варисторах, использовавшихся для комплектации ОПН, при испытании в НИИПТ в 2002 г. по упомянутой методике составило 1,5). Причины повреждения этих аппаратов в процессе эксплуатации в подавляющем большинстве случаев никак не были связаны со старением использованных для комплектации варисторов, а были вызваны разгерметизацией или квазистационарными перенапряжениями, для ограничения которых ОПН не предназначены.

Фактором, облегчающим работу варисторов ОПН в условиях эксплуатации, является то, что в последние годы, как правило, применяют ОПН с величиной наибольшего допустимого рабочего напряжения на 5–10% превышающей реальную величину длительно действующего на ОПН сетевого напряжения промышленной частоты. Этот запас обусловлен необходимостью повышения надежности работы ОПН в условиях возможного существования в сети квазистационарных перенапряжений.

Например, в сети 110 кВ (фазное напряжение около 63–73 кВ) используют ОПН с наибольшим допустимым рабочим напряжением 77–88 кВ. Длительность воздействия напряжения, которое больше 73 кВ, но меньше, чем наибольшее допустимое напряжение для такого ОПН, не превышает нескольких десятков минут в течение года, а значит, заметного влияния на изменение характеристик варисторов оказать не может. Поэтому становится ничтожной значимость процессов старения вследствие длительного воздействия напряжения промышленной частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Появление изменений в вольт-амперной характеристике ОПН целиком и полностью определяется соответствием характеристик использованных в нем варисторов условиям эксплуатации (длительно действующее на варисторы рабочее напряжение с учетом неравномерности его распределения по высоте ОПН и импульсные воздействия в режиме ограничения перенапряжений). Термины «старящиеся» и «нестарящиеся» применительно к варисторам без учета этих обстоятельств являются некорректными.
2. Защитные характеристики ОПН в процессе эксплуатации не изменяются даже при наблюдаемом увеличении тока проводимости под рабочим напряжением.
3. Использование счетчиков числа срабатываний ОПН, не регистрирующих параметры и скважность импульсных токов, не позволяет оценить возможные изменения характеристик варисторов ОПН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tapan K. Gupta. Application of Zinc Oxide Varistors, Journal of the American Ceramic Society, July 1990, Vol. 73, No. 7.
2. C. Heinrich, S. Hayefi, W. Kalkner. Degradation and Restoration of Metal Oxide Surge Arresters, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, August 25–29, 1997, Montreal, Quebec, Canada.
3. ГОСТ Р 52725-2007. Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
4. МЭК 60099-4. Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 4: Металлооксидные разрядники без искровых промежутков для защиты от перенапряжений сетей переменного тока.