

"Старение" варисторов в процессе эксплуатации ОПН"

Дмитриев В.Л. (заместитель директора по научной работе)

к.т.н. Красавина М.А. (технический директор)

ЗАО «Завод энергозащитных устройств»

Введение

Серьезное внимание уделяется надежности работы ограничителей перенапряжений (ОПН), учитывая возложенную на них важную роль защиты изоляции оборудования от перенапряжений. Для контроля стабильности свойств ОПН и способности противостоять эксплуатационным воздействиям разработаны и включены в национальный и международный стандарты [1, 2] методики, позволяющие проводить необходимые испытания на стадиях разработки конструкции ОПН и при его серийном производстве (типовые и приемосдаточные). Действующими нормативами предусмотрен периодический контроль свойств ОПН в процессе эксплуатации [3].

В последнее время на рынке электротехнической продукции, как отечественном, так и зарубежном, 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 измерений тока, протекающего через ОПН при воздействии рабочего напряжения, это, наконец, системы тепловизионного обследования состояния аппаратов. В своем большинстве эти устройства традиционно нацелены на выявление опасных изменений свойств варисторов в процессе эксплуатации.

Для оценки эффективности применения существующих средств диагностики необходимо понимание того, что же происходит с ОПН в процессе эксплуатации, какие воздействия на ОПН приводят к заметным или критическим изменениям основных характеристик варисторов.

В последние 10-15 лет изменения свойств варисторов под действием эксплуатационных факторов изучались преимущественно зарубежными исследователями, поскольку отечественная промышленность, за исключением нескольких отечественных изготовителей, выпуск варисторов практически прекратила. Основное внимание исследователей было сосредоточено на изменении свойств варисторов, подвергавшихся воздействию импульсов тока. Ниже приведены некоторые результаты таких исследований, опубликованные в зарубежной периодической печати и в материалах международных конференций, и потому не всегда доступные для широкого круга заинтересованных лиц.

1. Изменение свойств варисторов при импульсных воздействиях

Результаты исследования стабильности характеристик варисторов при воздействии импульсов тока показывают, что степень изменения вольтамперных характеристик варисторов зависит от максимальных значений, числа и частоты воздействий импульсов тока. В качестве примера на рис.1 показана типичная

зависимость от максимального значения, количества и формы воздействовавших импульсов изменений вольтамперной характеристики варисторов в области напряжений, близких к наибольшему допустимому напряжению для варистора. Из приведенных на рис.1 зависимостей видно, что для достижения тех же изменений в вольтамперной характеристике варистора при уменьшенной вдвое амплитуде прикладываемого импульса тока, требуется на порядок увеличить число воздействий.

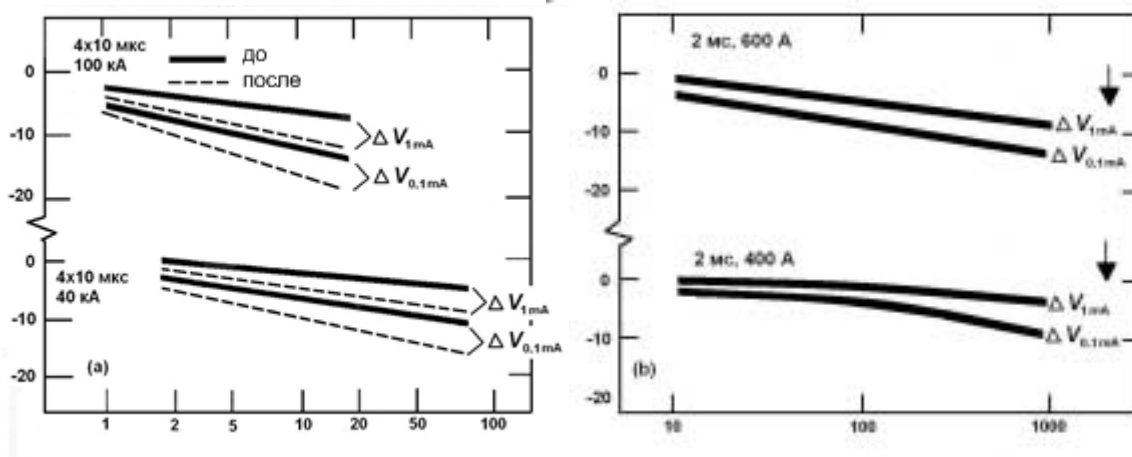


Рис.1. Влияние числа воздействовавших импульсов тока нормированных форм на вольтамперную характеристику варисторов.

$\Delta V_{0,1\text{mA}}$ и $\Delta V_{1\text{mA}}$ - 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 [4].

Если длительность и максимальное значение воздействующих импульсов тока сопоставимо или меньше соответствующих нормированных значений, то, даже после воздействия сотен и тысяч импульсов изменения в вольтамперной характеристике не превышают 5-10%. Следует отметить, что такой результат наблюдался в тех случаях, когда варисторы подвергались воздействиям 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 вольтамперной 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.

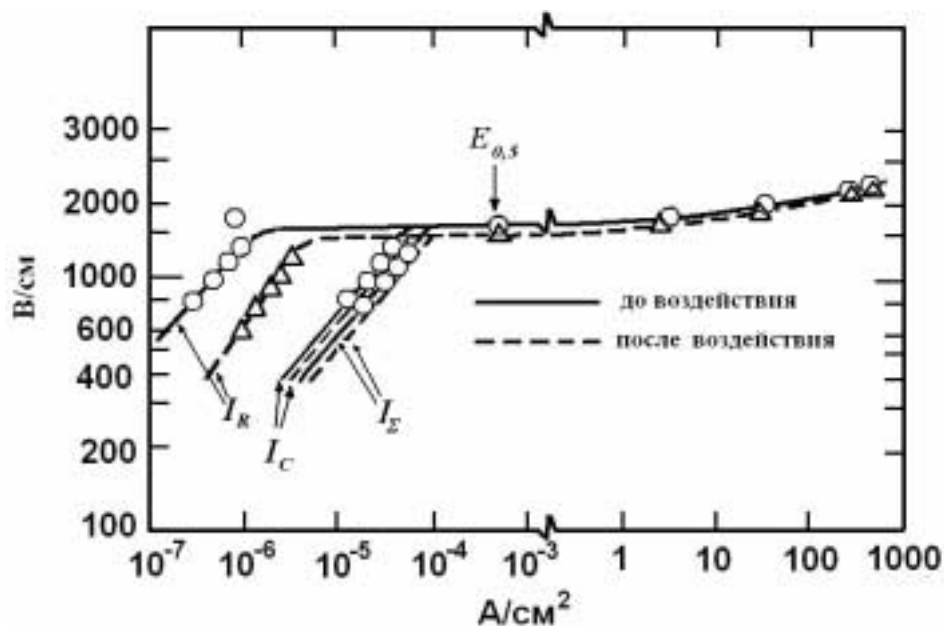


Рис.2. Изменения вольтамперной характеристики варистора вследствие импульсных воздействий. I_Σ – полный ток через варистор, I_C и I_R – соответственно емкостная и резистивная составляющие полного тока [4]. $E_{0.5}$ – удельное напряжение на варисторе при токе 0.5 мА.

Существенное влияние на изменения в вольтамперной характеристике оказывает частота приложения импульсов. В [5] 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.

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, уменьшения резистивной составляющей тока не наблюдается. Воздействие серии из 6-ти импульсов вызывает заметно большее увеличение резистивной составляющей, чем 6-ти одиночных импульсов.

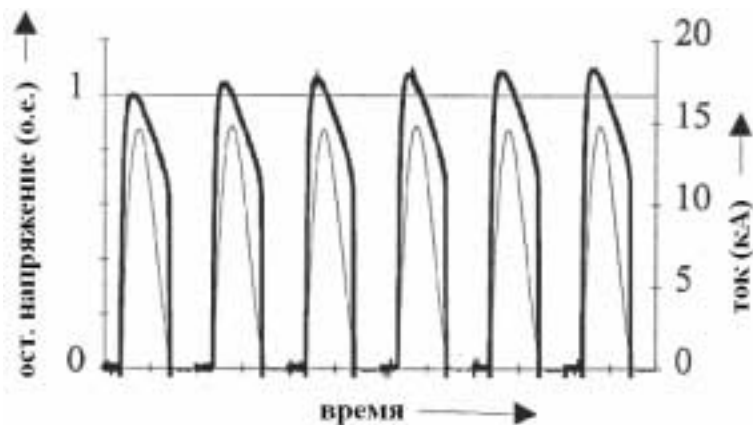


Рис.3. Изменение остающегося напряжения на варисторе при приложении серии из 6 импульсов тока 8/20 мкс с максимальным значением 15 кА (интервал времени между импульсами показан сокращенным) [5].

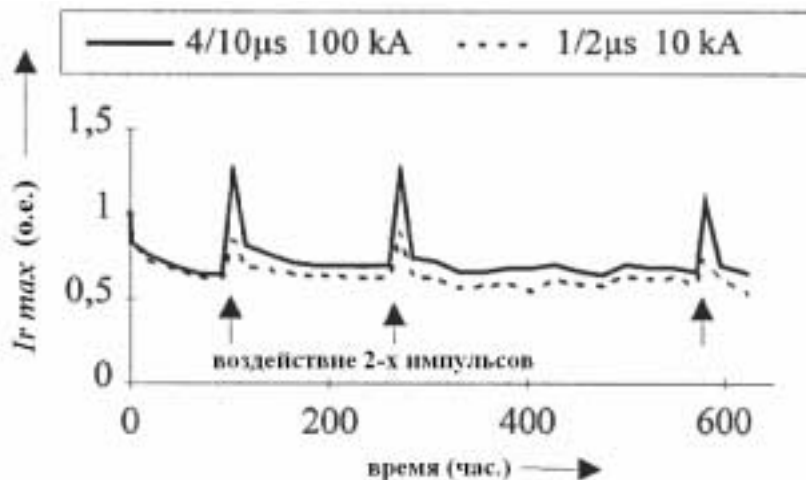


Рис.4. Изменение резистивной составляющей тока через варистор, находящийся под действием наибольшего рабочего напряжения при температуре 115 °С после приложения двух импульсов тока [5].

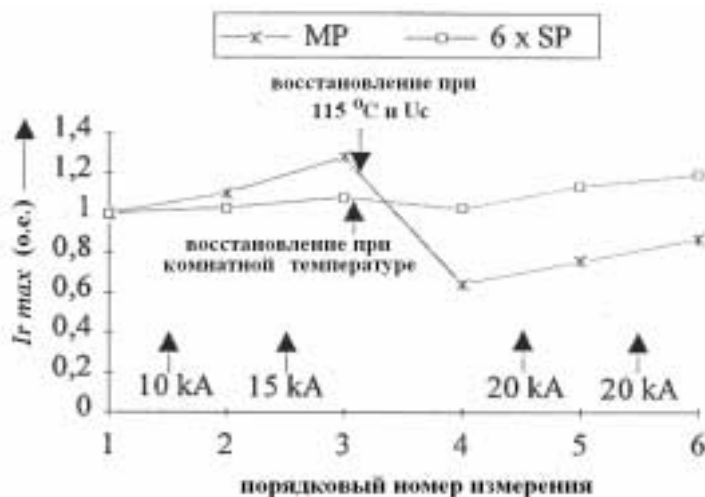


Рис.5. Изменение резистивной составляющей тока проводимости после воздействия импульсов тока на варисторы с последующим приложением (при комнатной и повышенной температурах) рабочего напряжения промышленной частоты. МР – воздействие серии из 6-ти импульсов тока с интервалом между сериями от 20 до 100 мс. SP – воздействие из 6-ти отдельных импульсов тока [5]. U_c – наибольшее рабочее напряжение варистора.

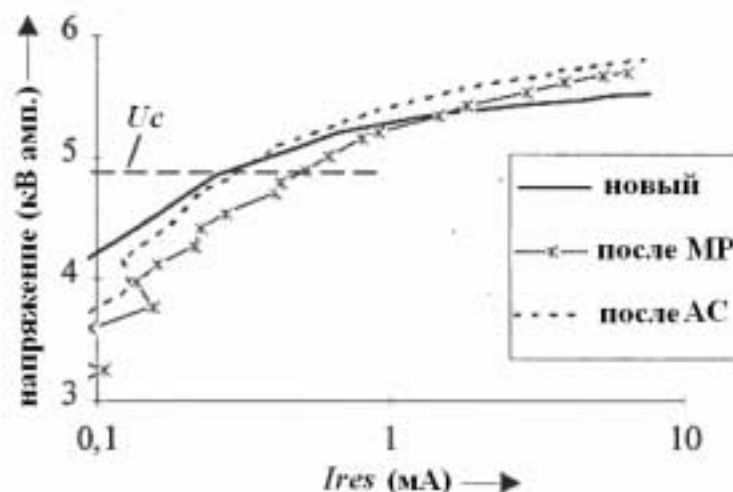


Рис.6. Вольтамперная характеристика (для резистивной составляющей тока) нового варистора с номинальным разрядным током 5 кА, этого же варистора после воздействия трех серий по 6-ть импульсов в каждой 8/20 мкс с максимальным значением тока 18 кА, и тот же варистор, но выдержанный в течение 72 ч при 115 °С под действием наибольшего рабочего напряжения промышленной частоты [5].

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 сказанного выше, в частности, следует, что применение счетчиков импульсов, учитывающих лишь общее число импульсов тока из широкого диапазона величин, не фиксирующих частоту их появления и ампер-временных характеристик импульсов тока, прошедших через ОПН, практически не дает сколько-нибудь полезной информации для оценки возможных изменений характеристик ограничителя перенапряжений. Так, если для такого счетчика числа срабатываний ОПН грозовой импульс тока 1 кА и импульс тока большой длительности 1 кА, прошедших через аппарат ОПН, воспринимаются как два равноценных воздействия, то для варисторов ОПН последствия от воздействия двух указанных импульсов далеко не равнозначны.

2. Изменение характеристик варисторов под действием рабочего напряжения промышленной частоты

В каждой новой конструкции ОПН стабильность вольтамперной характеристики варисторов под воздействием эксплуатационных факторов проверяют в процессе типовых испытаний по методикам, изложенным в стандартах [1, 2].

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 стандартизованные процедуры достаточно подробно описаны в [1, 2] 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 уточнение значений 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 ли 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 какой-либо корректировки испытательных напряжений не производится, а варисторы, использованные для комплектации 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 (естественно, как и при ускоренных испытаниях, при отсутствии воздействий импульсов тока на ОПН).

Из текстов национального и международных 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 "напряжения – время". Критерием соответствия варисторов требованиям стандартов является не те или иные результаты испытаний на ускоренное старение, а успешность проведения "рабочих испытаний" и определения характеристики "напряжения – время".

Во избежание недоразумений, в [1] прямо указано: "Состаренные варисторы по определению – варисторы, испытанные согласно п. 9.5.3" (аналогичное примечание имеется и в [2]).

К сожалению, в последние годы все 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", введенном 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 не трудно 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 Epcos, 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, мощность активных потерь в варисторе за время испытаний уменьшается до величины $0,8 \div 0,82$ от первоначального значения (варисторы типа E78SR123E, испытания НИИПТ, 2004 г). Однако, если увеличить испытательное напряжение 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 $0,9 \div 0,98$ от первоначального (испытания НИИПТ, 2002 г). 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 воздействующего напряжения над наибольшим допустимым, приводит к тому, что "нестарящиеся" 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 успешный 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% большей, чем реальная величина длительно воздействующего 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 класса 110 кВ (фазное напряжение около 63-73 кВ), используют ОПН с наибольшим допустимым рабочим напряжением 77÷88 кВ. Длительность воздействия напряжения большего, чем 73 кВ, но меньшего, 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. Очевидно, в процессе эксплуатации при таком соотношении допустимых и реально приложенных к ОПН напряжений становится ничтожной значимость процессов старения вследствие длительного воздействия напряжения промышленной частоты.

Заключение

1. Появление изменений в вольтамперной характеристике ОПН целиком и полностью определяется соответствием характеристик использованных в нем варисторов условиям эксплуатации (длительно воздействующее на варисторы рабочее напряжение с учетом неравномерности его распределения по высоте ОПН и импульсные воздействия в режиме ограничения перенапряжений). Термины "стареющие" и "нестареющие" 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.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52725 – 2007 Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия.
2. МЭК 60099-4 Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 4: Металлооксидные разрядники без искровых промежутков для защиты от перенапряжений сетей переменного тока
3. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования.
4. Taran K. Gupta. "Application of Zinc Oxide Varistors", Journal of the American Ceramic Society, July 1990, Vol. 73, No. 7.
5. 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