

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Дмитриев В.Л.,
Красавина М. А.
Пугачев С.И.

ЗАО "Завод энергозащитных устройств",
С.-Петербург, Россия

Введение

Как известно, под перенапряжением понимают кратковременное повышение напряжения в сети по отношению к номинальному рабочему напряжению. В электрических сетях перенапряжения возникают в результате воздействия мощных внешних источников электрической энергии, например разрядов молний, а также вследствие переходных процессов, вызванных изменением конфигурации сети при коммутациях. Появление перенапряжений может приводить к необратимому повреждению изоляции основного оборудования электрических сетей. Поэтому для бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией перенапряжения необходимо ограничивать до уровня безопасного для изоляции оборудования.

Для защиты от перенапряжений используют специальные защитные устройства (ЗУ), на которые возлагается задача по ограничению роста напряжения на изоляции защищаемого оборудования [1]. Основой простейших конструкций ЗУ является искровой промежуток, пробивающийся при превышении заданной величины напряжения. Участок сети, на котором происходит пробой промежутка, отключается из-за возникновения в сети большого тока короткого замыкания.

В защитных устройствах современных конструкций последовательно с искровым промежутком включают сопротивления, ограничивающие величину тока через промежуток и устраняющие тем самым возможность возникновения короткого замыкания в сети. Различные модификации подобных ЗУ, именуемых вентильными разрядниками, используются в электрических сетях всех классов напряжения. Вследствие широкого диапазона изменения перенапряжений, через ЗУ могут протекать токи, составляющие сотни ампер при коммутационных перенапряжениях, и десятки тысяч ампер – при грозовых. Очевидно, что для защиты изоляции оборудования от таких перенапряжений, величины применяемых в ЗУ сопротивлений должны уменьшаться по мере роста приложенного напряжения.

Первоначально для изготовления сопротивлений вентильных разрядников использовали материалы на основе карбида кремния (велиты, тервиты). Однако низкая нелинейность этих материалов не позволяла обеспечить одновременно малый ток при рабочем напряжении сети и приемлемый уровень ограничения перенапряжений. Поскольку уровень ограничения перенапряжений определяется характеристиками защищаемого оборудования, непременным атрибутом вентильных разрядников являлся искровой промежуток, назначение которого указано выше. В то же время использование искровых промежутков обусловило зависимость напряжения срабатывания разрядника от амплитуды, скорости нарастания и длительности воздействующих перенапряжений [2]. К

недостаткам данных ЗУ следует также отнести ограниченную способность материалов на основе карбида кремния пропускать импульсные токи большой амплитуды.

В конце 70-х годов прошлого столетия в качестве основы нелинейных сопротивлений было предложено использовать обладающий заметно большей нелинейностью материал на основе оксида цинка [3]. Применение таких материалов позволило заметно упростить конструкцию ЗУ за счет отказа от использования искровых промежутков. В настоящее время массовый выпуск ЗУ, в которых используется оксид цинка и получивших название ограничителей перенапряжения (ОПН), освоен как за рубежом, так и в нашей стране.

Основные характеристики ОПН

Рассматриваемые характеристики можно разделить на две основные группы:

Первая группа - вольтамперные характеристики ОПН при грозовых и коммутационных перенапряжениях (защитные характеристики), определяющие уровень ограничения перенапряжений на защищаемом оборудовании. Они определяются характеристиками используемого нелинейного материала. Здесь же следует отметить и особую точку на вольтамперной характеристике ОПН - его наибольшее допустимое напряжение ($U_{нр}$). Это напряжение промышленной частоты, при котором ОПН может работать неограниченно долго. Любое повышение напряжения сверх наибольшего допустимого приводит к увеличению тока, протекающего через ОПН и к его дополнительному нагреву.

Вторая группа – эксплуатационные характеристики ОПН, обеспечивающие способность аппарата выполнять свои функции в течение нормированного срока службы. К ним относится, в первую очередь, пропускная способность, т.е. способность аппарата выдержать без повреждений воздействие (в конкретных условиях и при определенной последовательности) заявленного числа импульсов тока с нормируемыми амплитудой и длительностью. Эта характеристика ОПН определяется типом использованных нелинейных сопротивлений - варисторов, и зависит также от конструктивных особенностей аппарата. К последним относится способность ОПН отдавать в окружающее пространство тепло, выделившееся в нелинейном сопротивлении при ограничении перенапряжения. На эксплуатационные характеристики влияют также масса ОПН, его габаритные размеры, тип материала корпуса (фарфор или полимер) и т.п.

Жесткая конкуренция на отечественном рынке привела к тому, что защитные характеристики ОПН, поставляемых различными изготовителями, достаточно близки. Этому способствовала и ориентация ряда отечественных изготовителей ОПН на использование в аппаратах варисторов зарубежного производства, как правило, фирмы Epcos, или, с целью снижения себестоимости ОПН, варисторов китайских предприятий.

Анализ вольтамперных характеристик

Нелинейное сопротивление ОПН собирают из отдельных керамических дисков - варисторов - получаемых прессованием и последующим высокотемпературным спеканием смеси ряда оксидов металлов. В состав смеси входят: оксид цинка (более 90% по массе), оксиды висмута, сурьмы, кобальта и др. Характеристики получаемых при этом варисторов, зависят от способа приготовления исходной массы (соотношения компонентов в смеси, тонкости помола, однородности массы и т.п.), параметров процесса прессования заготовок, а также режима обжига. Выпускаются варисторы диаметром до 130 мм и высотой до 50 мм. Как правило, наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение единичного варистора не превышает нескольких тысяч вольт. Поэтому для создания ОПН на большие, чем указано выше, напряжения, единичные варисторы со-

бирают последовательно в колонку. Рабочее напряжение колонки, в первом приближении, равно сумме рабочих напряжений варисторов, из которых она собрана.

На рис.1 представлены в относительных единицах вольтамперные характеристики ОПН, укомплектованных варисторами фирмы Epcos, рассчитанные по данным, полученным из каталогов и рекламных проспектов различных изготовителей.

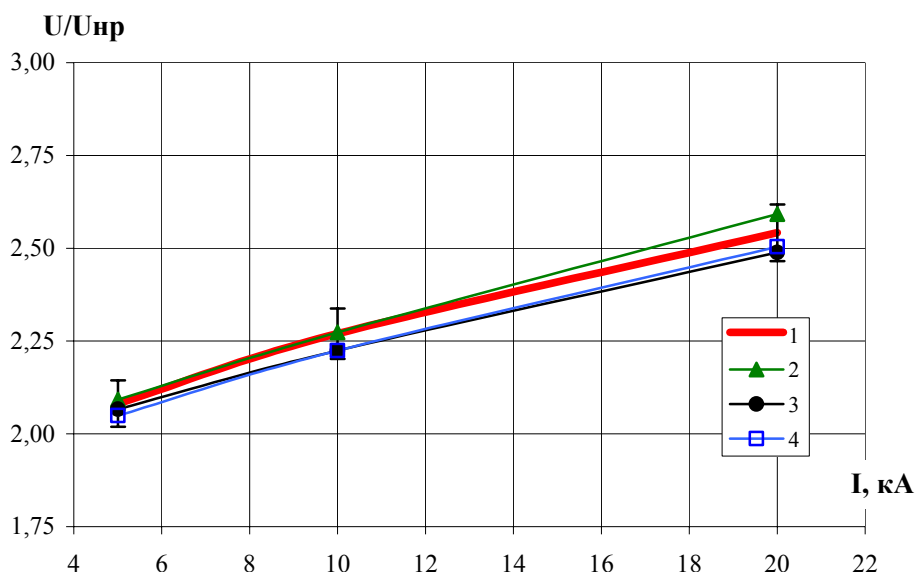


Рис.1 Напряжение на ОПН, укомплектованном варисторами диаметром 48 мм фирмы Epcos для сетей напряжением до 35 кВ производства:

- 1 - Epcos, единственный варистор типа SIOV-E48KV612E (показано отклонение напряжения $\pm 3\%$);
- 2 - Siemens (ЗЕК7 450-4V);
- 3 - ЗАО "Завод электротехнического оборудования";
- 4 - ОАО "Севзаппром".

Из рис. 1 видно, что использование варисторов одного и того же типа приводит у разных изготовителей к одинаковым защитным характеристикам ОПН (отличия в 1,5 - 2% в напряжениях практического значения не имеют, и могут быть отнесены к погрешности измерений). Напряжение на ОПН при токе 10 кА будет в 2,25 раза больше длительно допустимого рабочего напряжения (амплитудного значения) защитного аппарата независимо от того, кто этот аппарат изготовил (Siemens, ЗАО "Завод электротехнического оборудования" или ОАО "Севзаппром"). Аппараты собранные разными "сборщиками" из одинаковых варисторов, отличаются, в основном, конструктивными решениями, т.е. материалами внешней изоляции (полимер или фарфор), способом размещения варисторов в ОПН и технологией сборки.

Вольтамперные характеристики ОПН, укомплектованных варисторами разных изготовителей, (рис. 2), различаются больше, чем в предыдущем случае. Однако это различие, составляющее 5-6%, практического значения не имеет, поскольку уровень защищенности сети определяется, в первую очередь, схемой соединений и взаимным расположением оборудования и ОПН в распределительных устройствах. При этом не следует забывать, что указываемые изготовителями величины напряжений, остающихся на ОПН при нормированных значениях тока, - это максимально допустимые значения. У реальных аппаратов величины соответствующих напряжений несколько меньше.

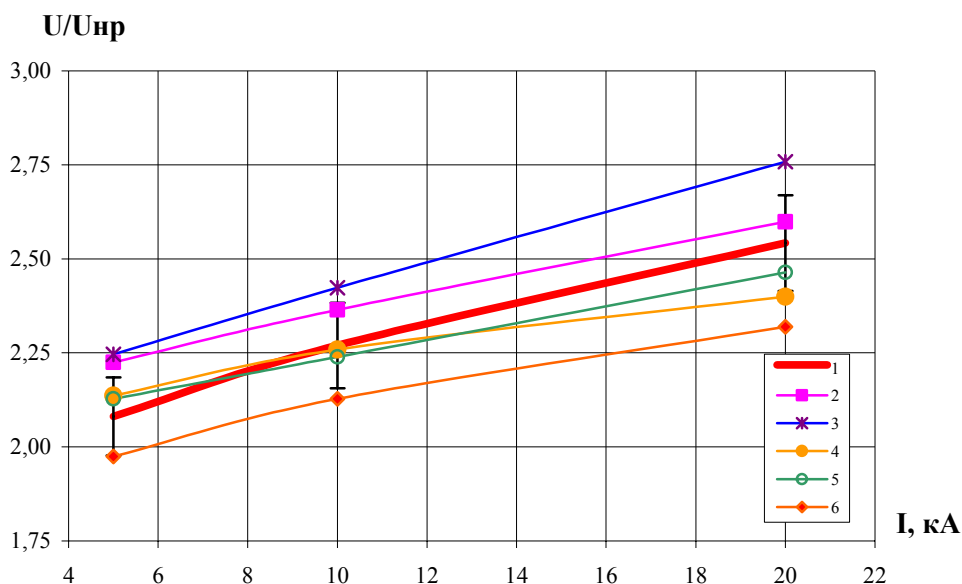


Рис.2 Напряжение на ОПН для сетей напряжением до 35 кВ с током пропускной способности 500 - 550 А производства:

- 1 - Ерсос, единственный варистор типа SIOV-E48KV612E (показано отклонение напряжения $\pm 5\%$);
- 2 - Tridelta;
- 3 - Tyco Electronics;
- 4 - ЗАО "Завод энергозащитных устройств";
- 5 - АВВ (PEXLIM R);
- 6 - ЗАО "Феникс 88".

Анализ эксплуатационные характеристик

Ограничители перенапряжений классифицируют по наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению, току пропускной способности и номинальному разрядному току.

Наибольшее длительно допустимое напряжение ($U_{нр}$) — это наибольшее, не приводящее к повреждению, действующее значение напряжения промышленной частоты, которое может быть приложено непрерывно к ОПН в течение всего срока его службы при нормированных воздействиях.

Ток пропускной способности (I_n) — это максимальное значение прямоугольного импульса тока длительностью 2000 мкс, воздействие которого ОПН должен выдержать, по крайней мере, 18 раз без потери рабочих качеств.

Номинальный разрядный ток ОПН (I_f) — максимальное значение грозового импульса тока 8/20 мкс, воздействие которого ОПН должен выдержать, по крайней мере, 20 раз без потери рабочих качеств.

Эксплуатационные характеристики ОПН определяются, в первую очередь, характеристиками использованных в его конструкции варисторов (табл. 1) [4]. В таблице для сравнения приведены характеристики варисторов с током пропускной способности 500 - 550 А, изготовленные на различных предприятиях. (Характеристики варисторов диаметром 28 мм с током пропускной способности 100 А, изготовленных НПО «Электрокерамика», включены в таблицу, поскольку это предприятие на протяжении более полутора десятилетий монопольно выпускало в СССР ограничители перенапряжений, комплектуя их этими варисторами).

Понятие *ток пропускной способности* тесно связано с другим, часто встречающееся в литературе понятием *поглощаемая ограничителем перенапряжений энергия*. Под поглощаемой энергией в данном случае подразумевают максимально допустимую энергию, выделяющуюся в виде тепла в варисторах при прохождении тока пропускной способности, которая не вызывает повреждения ОПН, находящегося под действием рабочего напряжения. Поскольку поглощенная в ОПН энергия практически пропорциональна амплитуде тока пропускной способности, увеличение этого тока приводит к соответствующему увеличению допустимой энергии. Выбор ОПН для установки в электрических сетях производится на основе сопоставления тока пропускной способности аппарата (поглощаемой энергии) с воздействиями, возникающими в месте его установки при перенапряжениях.

Оптимизация рецептуры исходного материала варистора и совершенствование технологии обжига позволили повысить удельную плотность тока пропускной способности (I_{np}/S с $0,1 \text{ А/мм}^2$ (варисторы первых поколений) до $0,3 \text{ А/мм}^2$ (у наиболее совершенных). Дальнейшее увеличение плотности тока для варисторов на основе оксида цинка встречает объективные трудности. Это связано с тем, что при прохождении импульсов тока соответствующей амплитуды через варистор, последний разогревается до температуры близкой к температуре разрушения полупроводящей структуры керамики. Поэтому повышение плотности тока пропускной способности определяется возможностью интенсификации охлаждения варисторов.

В отличие от удельной плотности тока, градиент напряжения (U_{np}/h) у варисторов всех изготовителей практически одинаков. При наибольшем допустимом рабочем напряжении, выбранном в соответствии с рекомендациями изготовителей, его значение составляет $0,1 \text{ кВ/мм}$. Это значение оптимально, поскольку при этом высота столба варисторов оказывается практически равной высоте корпуса соответствующего ОПН, выбираемой по условиям электрической прочности внешней изоляции.

Наиболее заметны отличия в характеристиках варисторов в мощности активных потерь (P_{np}) при рабочем напряжении. Воздействие рабочего напряжения и температуры приводит к изменению структуры материала варистора. Это, в свою очередь, может приводить как к увеличению мощности потерь в варисторах, так и к ее уменьшению. Опасность роста потерь связана с возможностью перегрева и повреждения ОПН из-за выделяющегося в варисторах тепла. Варисторы, мощность потерь в которых со временем возрастает, называют "старящимися", а в случае уменьшения потерь - "нестарящимися". Испытания на старение по стандартной процедуре продолжаются в течение 1000 часов. Степень старения в процессе испытаний характеризуют коэффициентом K_{cm} , определяемым отношением мощности потерь в варисторах в конце испытания к мощности потерь в начале испытаний.

При испытаниях на старение по стандартной процедуре при выбранном в соответствии с рекомендациями изготовителя наибольшем рабочем напряжении [5] мощность потерь в варисторах фирмы Epsos типа SIOV-E58R133E уменьшается. Это позволяет данной фирме, а также изготовителям ОПН, комплектующим выпускаемые ими ОПН этими варисторами, называть такие варисторы «нестарящимися». Однако проведенные в ОАО «НИИПТ» испытания показали, что даже незначительное увеличение рабочего напряжения на варисторах сверх рекомендуемого изготовителем приводит к заметному росту мощности потерь в варисторах к концу 1000 часового цикла испытаний (рис. 3). Это означает, что процесс старения варисторов можно рассматривать только применительно к тем условиям, в которых они эксплуатируются (или испытываются).

Удельные эксплуатационные характеристики варисторов

Производитель варисторов	I_{np}/S , А/мм ²	d , мм	h , мм	U_{np}/h , кВ/мм	P_{np}/V , мВт/см ³	K_{cm}
НПО "Электрокерамика" (испытания в НИИПТ, 2000 г.)	0,13	28	9	0,1	16	1,4
НИИ "Электрокерамика", г Сиань, КНР (испытания в НИИПТ, 2000 г.)	0,16	56	22,5	0,11	11,4	1,15
ЗАО "Завод энергозащитных устройств" (испытания в НИИПТ, 2004 г.)	0,33	46	14,4	0,08	3,5	1,0
Ерсос (сведения изготовителя)	0,28	48	34,5	0,1	5,5	0,7

Примечание: В таблице использованы обозначения: S - площадь рабочей поверхности варистора, d - диаметр варистора, h - высота варистора, V - объем варистора. .

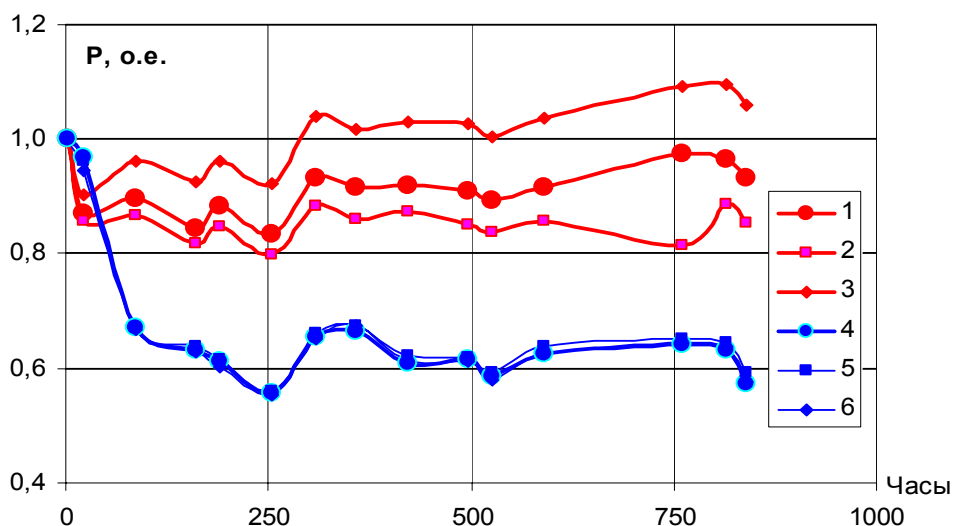


Рис 3 Изменение мощности потерь в варисторах SIOV-E58SR133E в процессе испытаний на старение:

- образцы 1 – 3 при воздействии увеличенного на 6,5% наибольшего рабочего напряжения;
- образцы 4 - 6 при воздействии наибольшего рабочего напряжения.

Таким образом, делать вывод о наличии или отсутствии старения варисторов в ОПН надо, не ссылаясь на данные изготовителя варисторов, а ориентируясь на выбранные изготовителем ОПН значения наибольшего рабочего напряжения. Испытание на старение необходимо проводить при напряжении характерном для наиболее нагруженных в ОПН варисторах.

Способ учета условий эксплуатации варисторов указан как в МЭК 60099-4, так и в существующем проекте национального стандарта на ограничители перенапряжений.. Для определения испытательного напряжения варисторов процедурой МЭК предусмотрено введение поправки к наибольшему рабочему напряжению, учитывающей неравномерность распределения напряжения вдоль колонки варисторов. Согласно МЭК, допус-

кается отказ от использования этой поправки в том случае, если будет показано, что распределение напряжения вдоль колонки линейное.

С целью выравнивания напряжения вдоль колонки применяют экраны, размеры и расположение которых определяют расчетным путем. Однако рассчитать размеры и положение экранных колец так, чтобы достичь равномерного распределения напряжения вдоль колонки варисторов в ОПН, не просто даже для идеализированного случая, когда параметры варисторов принимаются идентичными, а в непосредственной близости от ОПН отсутствуют заземленные и находящиеся под напряжением конструкции. В действительности геометрические размеры и вольтамперные характеристики варисторов имеют указываемый изготовителем заметный разброс, обусловленный технологией их производства. Так, высота варисторов SIOV-E48KV612E может варьироваться в пределах 33,9 - 35,1 мм (3,5%), а наибольшее рабочее напряжение от варистора к варистору может изменяться в пределах от 3,23 до 3,83 кВ (16%). Это неизбежно приводит к вариации в широких пределах градиента напряжения при длительно допустимом рабочем напряжении для единичных варисторов.

Из изложенного выше следует, что создать ОПН с линейным распределением напряжения вдоль колонки варисторов, т.е. с одинаковым градиентом напряжения по всей высоте колонки, даже в лабораторных условиях очень сложно. Для этого при комплектации колонки характеристики варисторов следует подбирать как с учетом места их установки в колонке, так и с учетом выравнивающего действия экранов, предусмотренных конструкцией ОПН. Однако достигнутое таким образом линейное распределение напряжения по высоте ОПН будет искажено, как только аппарат установят на действующей подстанции из-за влияния окружающего оборудования.

При разработке норм комплектования ОПН необходимо учитывать, что наибольшее рабочее напряжение аппарата не равно сумме наибольших рабочих напряжений варисторов в колонке. Ни один варистор в колонке не может находиться под напряжением, превышающим его длительно допустимое, поскольку ускоренное старение перегруженных варисторов может привести к их быстрому повреждению, а следовательно, к повреждению всего ОПН. Следовательно, наибольшее рабочее напряжение аппарата должно выбираться так, чтобы на наиболее нагруженных в колонке варисторах напряжение не превысило наибольшее допустимое. Это условие приводит к тому, что часть варисторов в колонке оказываются недогруженными ввиду неравномерного распределения напряжения вдоль колонки. Таким образом, защитные характеристики ОПН не могут быть лучше, чем характеристики единичных варисторов, из которых он собран.

Выводы

1. Совершенствование технологии позволило наладить в России промышленный выпуск варисторов, близких по характеристикам к варисторам ведущих мировых изготовителей.

2.. Защитные характеристики современных ограничителей перенапряжений как зарубежных, так и отечественных изготовителей (ABB, Siemens, Tridelta, ЗАО "Завод электротехнического оборудования", ЗАО "Завод энергозащитных устройств"; ОАО "Севзаппром", ЗАО "Феникс 88"), достаточно близки. Малые отличия в вольтамперных характеристиках существенного значения не имеют.

3. Результаты испытаний на старение на единичных варисторах должны критически оцениваться с точки зрения возможности их распространения на старение варисторов в ОПН.

4. При проведении испытаний варисторов на старение, выбор испытательного напряжения должен, как правило, проводиться с учетом поправки на неравномерность распределения напряжения вдоль колонки варисторов, а обоснованность уменьшения этой поправки требует каждый раз тщательного анализа.

Литература

1. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВт от грозových и внутренних перенапряжений. СПб: ПЭИпк Минтопэнерго РФ, 1999.
2. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: НЦ ЭНАС, 1998.
3. Балашов А.В., Голубева Н.П., Скидан Б.С. Керамика оксида цинка для варисторов //Стекло и керамика, 1999, № 2, с. 21-23.
4. Бойко А.А., Данилевский С.С, Дмитриев В.Л, Лубков А.Н. Сравнение характеристик варисторов, используемых для комплектации нелинейных ограничителей перенапряжений отечественными производителями // Сб. трудов ОАО НИИПТ. – СПб, 2004, № 59. – С.
5. "Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", International standard IEC 60099-4, Ed 2.0