

## **К вопросу о диагностике ОПН в эксплуатации**

к.т.н. Дмитриев М.В. (ЗАО «Завод энергозащитных устройств»)

В [1] была развернута дискуссия о подходах к диагностике ОПН под рабочим напряжением сети, о недостатках нормативной и технической базы, существующей в области диагностики ОПН. Сегодня мы продолжаем эту тему.

### **Измерение тока проводимости в эксплуатации**

Некоторые специалисты ставят под сомнение необходимость в эксплуатации какой-либо диагностики ОПН качественного производства. С такой позицией трудно согласиться хотя бы потому, что ОПН рассчитываются на одни воздействия, а на практике подвергаются другим. Диагностика ОПН, безусловно, должна осуществляться, а ее проблемы необходимо обсуждать.

Согласно нормам [2] в эксплуатации измерению подлежит действующее значение полного тока проводимости ОПН, которое сравнивается с паспортными данными, т.е. с результатами испытаний на заводе-изготовителе.

Как правило, изготовитель ОПН указывает в паспорте значение тока проводимости, полученное при воздействии на ОПН его наибольшего рабочего напряжения  $U_{нрo}$ .

При диагностике ОПН 6-35 кВ в эксплуатации измерения тока проводятся при подаче напряжения от стороннего (лабораторного) источника, в качестве величины которого выставляется значение  $U_{нрo}$ .

При диагностике ОПН 110-750 кВ измерения тока проводятся без отключения ОПН под рабочим напряжением сети [1,2]. При этом в подавляющем большинстве случаев на момент измерений тока в ОПН фазное значение напряжения сети отличается от  $U_{нрo}$ .

Сетевые и заводские измерения тока в ОПН, проведенные в разных условиях с точки зрения уровней воздействующего напряжения и других влияющих факторов (гармонического состава напряжения, температуры окружающего воздуха), сравнивать напрямую некорректно. Это является одной из проблем диагностики ОПН 110-750 кВ под рабочим напряжением и, в частности, означает, что оценка состояния ОПН в эксплуатации возможна лишь при одновременном наличии результатов измерений и тока проводимости, и напряжения в месте установки ОПН.

Определенным выходом из сложившейся ситуации было бы рекомендовать заводам-изготовителям указывать в паспорте на ОПН значение тока проводимости не при одном значении напряжения ( $U_{нрo}$ ), а при нескольких. Однако вряд ли удастся предусмотреть все возможные в эксплуатации напряжения.

Другим выходом из сложившейся ситуации является пересчет результатов сетевых измерений тока проводимости к тем, которые были бы получены в случае, если бы на ОПН воздействовало его наибольшее рабочее напряжение  $U_{нрo}$ .

Вольтамперная характеристика ОПН носит резко нелинейный характер, прежде всего, при напряжениях, превышающих его наибольшее рабочее  $U_{НРО}$ . При напряжениях, меньших  $U_{НРО}$ , вольтамперная характеристика в первом приближении может считаться линейной, т.е. имеет место линейная зависимость тока в ОПН от приложенного к ОПН напряжения. Формула пересчета результатов сетевых измерений должна учитывать характер вольтамперной характеристики, или, иными словами, должна учитывать, проведены ли сетевые измерения при напряжениях больших или меньших, чем  $U_{НРО}$ .

Согласно [3-5] в сетях 110-750 кВ наибольшее рабочее напряжение ОПН выбирается несколько выше, чем фазное значение наибольшего рабочего напряжения сети, т.е. справедливо соотношение

$$U_{НРО} \geq \frac{U_{НР}}{\sqrt{3}}.$$

В сетях 220-750 кВ значение  $U_{НРО}$  выбирается с запасом 5-10% относительно фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети, т.е.  $U_{НРО} = (1.05 \div 1.10) \cdot U_{НР} / \sqrt{3}$ . В сетях 110 кВ значение наибольшего рабочего напряжения сети составляет  $126 / \sqrt{3} = 73$  кВ, а в ряде случаев применяются ОПН 110 кВ с  $U_{НРО} = 88$  кВ, которое на 20% выше, чем 73 кВ. Известны так же случаи, когда в сетях 110 кВ используются ОПН с  $U_{НРО} = 102$  кВ, которое на 40% выше, чем 73 кВ.

Учитывая изложенное, видно, что ОПН 110-750 кВ эксплуатируются при напряжениях, меньших (особенно в сетях 110 кВ), чем их паспортные значения  $U_{НРО}$ . Кроме того, следует принять во внимание, что реальный уровень напряжения сети, как правило, соответствует номинальному напряжению сети  $U_{НОМ}$ , а не наибольшему рабочему  $U_{НР}$ , на которое опирается выбор ОПН. Соотношение  $U_{НОМ}$  и  $U_{НР}$  по данным [6] приведено в таблице.

$U_{НОМ}$ , кВ	$U_{НР} / U_{НОМ}$ , о.е.
110-220	1,15
330	1,10
500-750	1,05

При воздействии на ОПН напряжений, меньших его  $U_{НРО}$ , в ОПН протекает, главным образом, емкостный ток, а активная составляющая тока практически отсутствует. Поскольку емкость ОПН слабо зависит от приложенного напряжения [7], вольтамперная характеристика может в первом приближении считаться линейной, т.е. справедливо соотношение

$$\frac{U_{НРО}}{I_{НРО}} = \frac{U_{ИЗМ}}{I_{ИЗМ}} = \frac{U_{НРО}}{I_{ИЗМ,НРО}},$$

где  $I_{НРО}$  – ток проводимости ОПН при его наибольшем рабочем напряжении  $U_{НРО}$  по результатам заводских испытаний;  $I_{ИЗМ}$  и  $U_{ИЗМ}$  – ток и напряжение при

сетевых измерениях;  $I_{ИЗМ,НРО}$  – ток при сетевых измерениях, приведенный к наибольшему рабочему напряжению  $U_{НРО}$ .

Тогда

$$I_{ИЗМ,НРО} = I_{ИЗМ} \frac{U_{НРО}}{U_{ИЗМ}}. \quad (1)$$

Значение  $I_{ИЗМ,НРО}$  соответствует напряжению  $U_{НРО}$  и, следовательно, его допустимо сравнить со значением  $I_{НРО}$ , приведенным в паспорте ОПН. Соотношение между двумя этими токами позволяет судить о состоянии ОПН, хотя следует помнить:

- полный ток проводимости не является оптимальным критерием для оценки состояния ОПН [1];
- гармонический состав рабочего напряжения сети и выходного напряжения заводского испытательного трансформатора различен, что сказывается на результатах измерения полного тока проводимости;
- температура окружающей среды при выполнении сетевых и заводских измерений различна; для учета этого факта в формуле (1) используют дополнительный эмпирический коэффициент, учитывающий отличие температуры от нормальной, составляющей  $20^{\circ}\text{C}$  (см. [7]).

Несмотря на важность величины напряжения, воздействующего на ОПН при измерениях тока, и необходимость использования формулы (1), составление протокола далеко не всегда сопровождается указанием уровня (и качества) напряжения, при котором проведены измерения – это происходит как из-за непонимания важности величины напряжения, так и из-за отсутствия на некоторых (маломощных) подстанциях измерительных трансформаторов напряжения. При отказе от приведения результатов измерений к условиям заводских наибольшие ошибки следует ожидать при диагностике под рабочим напряжением ОПН 110 кВ.

В тех случаях, где трансформаторы напряжения (ТН) имеются, достоверную информацию о значении фазных напряжений получить все равно нельзя, поскольку вторичные обмотки ТН включены таким образом, что дают представление лишь о линейном (междуфазном) напряжении. Точное значение фазного напряжения можно получить делением линейного напряжения на  $\sqrt{3}$  только при идеальной симметрии по фазам параметров сети и режима, что имеет место далеко не всегда.

### **Регистрация срабатываний ОПН**

В процессе эксплуатации ОПН подвергаются воздействию, как рабочего напряжения сети, так и различных видов перенапряжений. Диагностику ограничителей можно считать исчерпывающей, если она базируется на результатах измерений и тока проводимости ОПН под рабочим напряжением, и токов в них при перенапряжениях. Остановимся подробнее на последней из составляющих диагностики.

Достаточно часто возникает вопрос о необходимости оснащения ОПН не только устройствами измерения тока проводимости, но и регистраторами срабатываний. Как правило, речь идет об использовании регистраторов лишь совместно с ОПН 110-750 кВ, поскольку:

- стоимость таких устройств высока по сравнению со стоимостью ОПН 6-35 кВ;
- при протекании в ОПН импульсных токов падение напряжения на индуктивности таких регистрирующих устройств может достигать нескольких киловольт, что заметно по сравнению с остающимися напряжениями ОПН 6-35 кВ и, как следствие, приводит к снижению защищенности оборудования 6-35 кВ.

Исторически первыми появились системы регистрации срабатываний вентильных разрядников – предыдущего относительно ОПН поколения аппаратов, предназначенных для защиты оборудования сетей от импульсных перенапряжений. Тогда в цепи заземления вентильных разрядников устанавливались счетчики числа срабатываний. Необходимость установки таких устройств была тесно связана со спецификой работы вентильных разрядников, имеющих последовательные искровые промежутки.

При возникновении импульсных перенапряжений опасной величины (как правило, грозовых перенапряжений) искровой промежуток пробивался, и в нелинейном сопротивлении протекал ток, что приводило к ограничению перенапряжений за счет перехода энергии перенапряжений в тепловую, выделяющуюся в нелинейных элементах.

Помимо импульсного тока в разряднике протекал сопровождающий ток от напряжения промышленной частоты. При первом переходе тока через ноль дуга в искровом промежутке гасла, и разрядник переходил в исходное состояние. Величина сопровождающего тока (см. [8]) могла достигать десятков ампер, но не превосходила 80-100 А, так как в противном случае искровой промежуток не обеспечивал гашение дуги (в разрядниках легкого режима по [9]).

Энергия, выделяющаяся в нелинейном сопротивлении разрядника за одно срабатывание искрового промежутка, может быть определена как

$$W_{PB} = W_{ИМП} + W_{50Гц},$$

где  $W_{ИМП}$  – энергия от импульсного тока,  $W_{50Гц}$  – энергия от сопровождающего тока промышленной частоты.

Так как вольтамперная характеристика элементов была слабо нелинейная, сопровождающий ток был заметной величины и при каждом срабатывании давал ощутимое тепловыделение  $W_{50Гц}$  вне зависимости от того, какой энергией  $W_{ИМП}$  обладали импульсные перенапряжения. Учитывая свойства материала нелинейных элементов (как правило, это вилит), каждое срабатывание искрового промежутка, вне зависимости от энергии импульсных перенапряжений, приводило к заметному снижению остаточного ресурса элементов разрядника.

Согласно [10] вентильный разрядник рассчитан на 20-30 срабатываний. Если число срабатываний, зафиксированных в эксплуатации при помощи счетчиков, оказывалось заметно больше, то это было основой для вывода разрядника из эксплуатации. Поскольку для разрядника важным является сам факт срабатывания, т.е. число случаев протекания сопровождающего тока, то параметры импульсных токов (величина  $W_{имп}$ ) имели второстепенное значение. Это позволяло использовать счетчики простой конструкции.

В качестве примера важности регистрации числа срабатываний разрядников можно привести случай, когда при коммутациях ошиновки разъединителями на ней развиваются высокочастотные перенапряжения, что проанализировано в [11]. Высокочастотные (ВЧ) перенапряжения могут достигать значительной величины, но при этом обладают малой энергией. Величина ВЧ перенапряжений способна приводить к срабатыванию искровых промежутков разрядников. При этом, несмотря на малую энергию  $W_{имп}$ , в эксплуатации зафиксированы случаи разрушений разрядников, что можно объяснить лишь опасностью энергии  $W_{50Гц}$  и многократностью ее выделения. Если в эксплуатации показания счетчиков числа срабатываний разрядников были значительны, то косвенно этого могло свидетельствовать о существовании ВЧ перенапряжений и их опасности для оборудования и, прежде всего, для самих разрядников.

Заметное превышение показаний счетчика на одной из фаз по сравнению с показаниями счетчиков других фаз, например, может говорить о снижении разрядного напряжения искрового промежутка – серьезном основании для вывода разрядника из эксплуатации. Так или иначе, но необходимость в счетчиках числа срабатываний напрямую была связана с особенностями разрядников и не вызывала сомнения.

В настоящее время в сетях осуществляется массовая установка ОПН – более современного защитного аппарата, не имеющего искрового промежутка вследствие высокой нелинейности вольтамперной характеристики нелинейных сопротивлений (варисторов). Ограничители перенапряжений ОПН рассчитаны на длительное воздействие напряжения  $U_{нро}$  промышленной частоты. В случае, если напряжение промышленной частоты не повышается сверх  $U_{нро}$ , заметная энергия может выделяться в варисторах ОПН лишь при импульсных перенапряжениях, сопровождаемых импульсными токами

$$W_{опн} = W_{имп}$$

При правильном выборе  $U_{нро}$  ресурс ОПН определяется импульсными токами и, в отличие от разрядников, не зависит от тока проводимости под рабочим напряжением сети. Степень опасности для ОПН импульсных токов определяется выделяющейся при них энергией

$$W_{имп} = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt ,$$

которая зависит и от величины, и от длительности (формы) импульсного тока. Вместе с тем, регистраторы числа срабатываний реагируют на факт протекания

тока, величина которого больше определенного значения, и никак не учитывают формы импульсного тока, а значит не дают представления об энергии, которая выделяется в ОПН. Для иллюстрации этого на расчетной осциллограмме рис.1 при грозовых перенапряжениях приведены два импульса тока в типовом ОПН 110 кВ (остающееся напряжение [3,5] при грозовом импульсном токе 10 кА формы 8/20 мкс составляет 250 кВ). Несмотря на равенство максимальных значений токов (около 4 кА), выделяющаяся энергия для первого импульса (около 10 кДж) в четыре раза меньше, чем для второго (около 40 кДж).

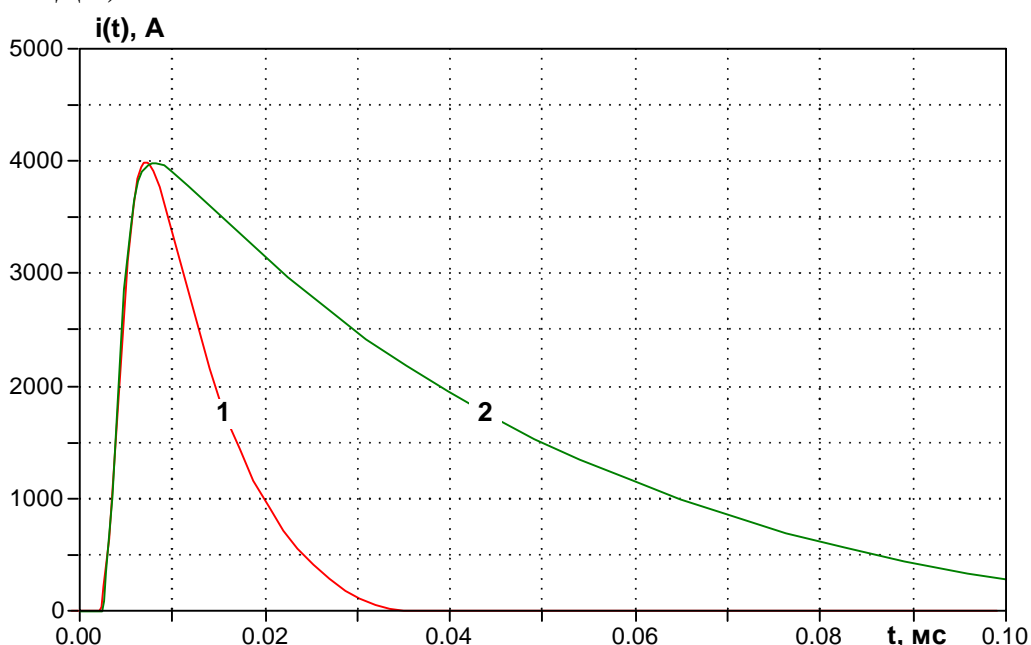


Рис.1. Расчетная осциллограмма двух грозовых импульсных токов различной формы.

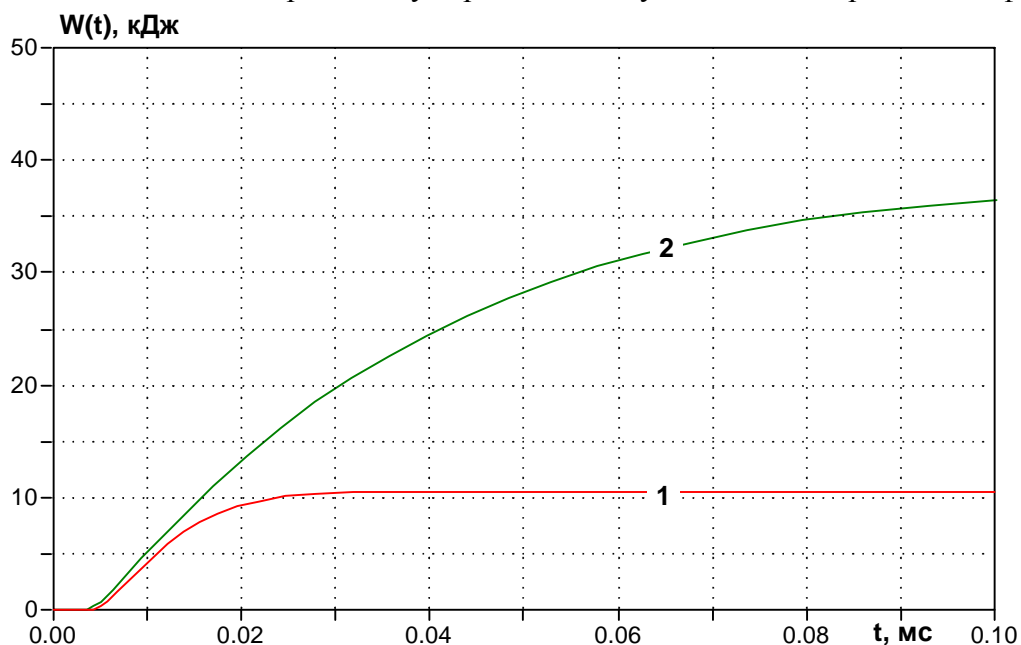


Рис.2. Энергия, выделяющаяся в типовом ОПН 110 кВ при протекании токов.

Учитывая изложенное, счетчики числа срабатываний ОПН не позволяют сделать заключение о выделяющейся в ОПН энергии, а их показания не могут

быть использованы для оценки остаточного ресурса ОПН и принятия решения о возможности его дальнейшей эксплуатации.

Счетчики числа срабатываний (при должном принципе работы и качестве изготовления) могут давать представление лишь о том, сколько раз ОПН пропускал в себя импульсные токи. Такая информация теоретически может быть полезна для того, чтобы оценить эффективность работы ОПН в той или иной точке сети: если ОПН не работает, то зачем его ставить? Однако на практике, даже в случае нулевых показаний счетчика, отказ от установки ОПН вряд ли возможен. Во-первых, потому, что нет уверенности в корректной работе счетчика, а во-вторых – вследствие статистической природы грозových и коммутационных перенапряжений. Например, согласно [12] опасные грозových перенапряжения, способные повредить изоляцию оборудования распределительного устройства, могут в типовых схемах возникать один раз в сотни лет эксплуатации, т.е., вполне возможно, ни разу за срок службы 25-30 лет конкретного ОПН.

Полезную информацию о срабатываниях ОПН могли бы дать более сложные по сравнению со счетчиками устройства – такие, которые давали бы представление о выделяющейся в ОПН энергии, т.е. были бы построены на принципе интегрирования кривой тока. Подобные устройства, очевидно, будут гораздо дороже примитивных счетчиков, и об их массовом применении совместно с ОПН 110-750 кВ говорить не приходится.

Предположим, при помощи сложных устройств регистрации будет достоверно известна суммарная величина энергии  $W_{\text{ОПН}}^{\text{СУМ}}$  перенапряжений, которая выделилась в ОПН в процессе эксплуатации. Эту энергию можно было бы использовать для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации ОПН только в том случае, если бы был известен ресурс конкретного ОПН по энергии  $W_{\text{ОПН}}^{\text{МАКС}}$ .

Понятие ресурса ОПН рассмотрено в [12] (Приложение 8), где в качестве примера проведены расчеты для ОПН 750 кВ. Несмотря на это, отечественные и зарубежные производители ОПН понятия «ресурс ОПН» не вводят (по крайней мере, в том смысле, о котором говорится в [12]), и оно не используется при выборе ОПН – см. [3,5].

Методика выбора ОПН, основанная на понятии ресурса, достаточно сложно реализуема, поскольку:

- свойства нелинейных сопротивлений (варисторов) ОПН таковы, что эти варисторы обладают значительным ресурсом, «точное» значение которого в испытаниях не выявить;
- по своим последствиям для варисторов ОПН нельзя приравнять один импульс тока с энергией  $W_{\text{ИМП}}$  и десять импульсов тока с энергией  $0.1 \cdot W_{\text{ИМП}}$ ;
- изменения свойств варисторов, вызванные протеканием в них импульсных токов, компенсируются последующим воздействием на варисторы рабочего напряжения сети [13].

Оценка состояния ОПН в эксплуатации, как и методика выбора ОПН, не могут быть построены на основе информации о суммарной выделенной энергии  $W_{\text{ОПН}}^{\text{СУМ}}$ . Поэтому регистраторы срабатываний ОПН, которые могли бы дать информацию  $W_{\text{ОПН}}^{\text{СУМ}}$ , с практической точки зрения не имеют смысла. Такие регистраторы могут быть полезны лишь при их массовой установке в энергосистемах, так как это позволит собрать обширные статистические данные об импульсных токах в ОПН, о выделяющихся энергиях.

Статистические данные представляют большой научный интерес, однако не позволяют сделать вывод об условиях эксплуатации каждого конкретного ОПН. Вряд ли эксплуатирующие организации заинтересованы в финансировании научных исследований третьих лиц, тем более, что результаты этих исследований появятся лишь спустя долгие годы.

### Выводы

Основные выводы, которые можно сделать, следующие:

1. при диагностике ОПН 110-750 кВ в сети под рабочим напряжением необходимо заносить в протокол не только результаты измерений тока проводимости, но и результаты измерений фазного напряжения сети в месте установки ОПН;
2. результаты сетевых измерений тока проводимости ОПН 110-750 кВ под рабочим напряжением необходимо (особенно для ОПН 110 кВ) пересчитывать к тем, которые соответствуют наибольшему рабочему напряжению ОПН, для чего допустимо использовать выражение (1);
3. при современном развитии техники оснащение ОПН какими-либо регистраторами срабатываний не имеет практического смысла.

1. Дмитриев В.Л. Влияние загрязнений на поверхности внешней изоляции на достоверность оценки состояния ОПН при периодических обследованиях // «Новости Электротехники», №5(47), 2007.
2. РД 34.45-51.300-97 "Объем и нормы испытаний электрооборудования".
3. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ. –М.: Изд-во НТК "Электропроект", 2000.
4. Дмитриев М.В. Особенности проектирования сетей 110-220 кВ, содержащих ОПН // «Новости Электротехники», №5(41), 2006.
5. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ. –СПб.: Изд-во «НИВА», 2007. –60 с. ISBN 5-86456-081-2.
6. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции: Межгос. стандарт. –Введ. 01.01.99. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. –50 с.
7. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. –Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. –304 с.
8. Техника высоких напряжений / Под научной редакцией Г.С. Кучинского. –СПб: Энергоатомиздат, 2003. –608 с.
9. ГОСТ 16357-83 Разрядники вентильные переменного тока на номинальное напряжение от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия. (С изменениями 1-3) – М.: Изд-во стандартов, 1989.



10. Техника высоких напряжений / Под общей редакцией Д.В. Разевига. –М: Государственное энергетическое издательство, 1963. –472 с.
11. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. –М.: ОРГРЭС, 1998.
12. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходева. –2-е изд. –СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. –355 с.
13. С.Heinrich, S.Hayeb, W.Kalkner. Degradation and restoration of metal oxide surge arresters // 10<sup>th</sup> International symposium on high voltage engineering ISH-97, Canada, 1997.