

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

МИСРИХАНОВ М.Ш., д-р техн. наук, ГРЕЧИН В.П., канд. техн. наук, ПУТОВА Т.Е., МАЛЮШИЦКИЙ П.Г., инженеры

На основе опыта эксплуатации и анализа аварийных ситуаций проанализированы существующие методики оценки технического состояния ограничителей перенапряжений различных типов и фирм-изготовителей. Определены параметры, которые необходимо учитывать при диагностировании и входном контроле ограничителей перенапряжений перед вводом в эксплуатацию.

*Ключевые слова:* ограничители перенапряжений, диагностирование, тепловизионный контроль.

## RELIABILITY INCREASING OF OVERVOLTAGE LIMITER TECHNICAL CONDITION EVALUATION

M.Sh. MISRIKHANOV, Ph.D., V.P. GRECHIN, Ph.D., T.E. PUTOVA, engineer, P.G. MALYUSHITSKIJ, engineer

The work represents the existed methods analysis of technical condition evaluation of overvoltage limiters of different types and manufacturers on the field experience and emergency analysis base. The authors have determined the parameters, which are necessary to be taken into account during diagnosing and overvoltage limiter inspection test before installation.

*Key words:* overvoltage limiters, diagnosing, thermal imaging control.

**Введение.** Защита электротехнического оборудования (ЭО) от грозовых и коммутационных перенапряжений является важнейшим элементом системы надежности и безопасности функционирования электрических станций и сетей. В настоящее время для защиты от грозовых перенапряжений в эксплуатации находится большое количество вентильных разрядников (РВ) напряжением 6–750 кВ, срок службы большей части которых истек. Устаревшие РВ исчерпали свой технический и моральный ресурсы по пропускной способности и защитным характеристикам.

В настоящее время производится замена РВ на ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), состоящие из активного нелинейного сопротивления (НС) – варистора, выполненного на основе оксида цинка, и изоляционных и проводниковых конструкций, помещённых в герметичный полимерный или фарфоровый корпус.

Основным отличием РВ от ОПН является то, что у РВ в нормальном состоянии НС отключено от сети, поэтому РВ отстроен от коммутационных перенапряжений (ПН) и рассчитан на определенную амплитуду тока грозового импульса и количество срабатываний.

ОПН подключен к защищаемому ЭО постоянно и реагирует на все повышения напряжения в электрической сети. Поэтому к ОПН предъявляются более жесткие требования к термической устойчивости и ресурсу НС. В частности, ОПН должен быть рассчитан на грозовые и коммутационные импульсы ПН, а также на кратковременные и длительные повышения напряжения различных частот, т.е. на достаточно тяжелые условия работы в течение всего срока эксплуатации.

ОПН применяются для защиты основного ЭО объектов, надежность работы которых влияет на безопасность и эффективность пространственной экономики, зависящей от устойчивого электроснабжения организаций всех форм деятельности. Поэтому все более актуальными становятся вопросы по обеспечению надежности работы самих ОПН и качества оценки их технического состояния (ТС) как в процессе эксплуатации, так и, особенно, перед монтажом и вводом в эксплуатацию [1, 2].

**Краткий анализ методик диагностирования ОПН.** Большое количество производителей ОПН (НПО «Электрокерамика», АФ-Полимер, Фарфор, Феникс-88, НПО «Аппарат», Таврида-Электрик, Сименс и другие) привело к наличию на рынке различных типов ОПН и их модификаций, различающихся как по техническим характеристикам, так и по качеству исполнения. Это вносит неопределенность в использование нормативной документации [3–5], что затрудняет оценку качества, выбор места установки и определение четких условий применения и эксплуатации.

В настоящее время не существует единого подхода к вопросам диагностирования ОПН, отсутствует унифицированная методика, выявляющая и учитывающая весь перечень возможных дефектов ОПН, которые могут возникнуть при их изготовлении, транспортировке, хранении, монтаже и эксплуатации. Рекомендованные методики (разработанные изготовителями и существующая нормативная документация [6]) применимы только для ограниченного типа ОПН. Многие ОПН, на которые распространены эти рекомендации, не выпускаются или модифицированы. Изготавливаемые новые типы ОПН отличаются характери-

стиками как друг от друга, так и от первых выпусков ОПН.

В [6] предлагается нормировать только два параметра ОПН без учета их конструктивных особенностей, зависящих от изготовителей:

– активное сопротивление ( $R$ ), которое для всех типов ОПН должно быть более 3000 МОм независимо от модификации;

– величину тока проводимости ( $I_{пр}$ ) для приведенного в [6] перечня типов ОПН, причем, «устаревших» и снимающихся с производства.

В [5] рекомендуют проведение тепловизионного контроля, при этом браковку предлагается производить методом сравнения результатов измерений ОПН, установленных в разных фазах.

Анализ технической документации производителей ОПН показывает, что предлагаются разные подходы к нормированию контрольных параметров ОПН, полученных при испытаниях, для определения их пригодности к длительной эксплуатации:

– многими предприятиями нормируется только  $I_{пр}$  при испытательном напряжении ( $U_{исп}$ ) или величина напряжения на ОПН при определённой величине  $I_{пр}$ ;

– некоторые предприятия дополнительно к  $I_{пр}$  устанавливают норму на активную составляющую тока проводимости ( $I_{пр}^a$ );

– ряд предприятий устанавливают контроль частичных разрядов.

Но чаще всего нормирование проводится по одному параметру –  $I_{пр}$ . При этом браковка ОПН осуществляется по одному (двум) признакам:

- превышение величины  $I_{пр}$  более 1 мА или выход за границы допустимого диапазона  $I_{пр}$  (для конкретного типа ОПН);

- отклонение значения  $I_{пр}$  при вводе и в период эксплуатации от значения  $I_{пр}$  при испытании на заводе.

Однако для более качественной оценки технического состояния ОПН, кроме вышеуказанных двух традиционных параметров, необходимо использование диэлектрических свойств ОПН, проявляющихся при напряжениях, не превышающих наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение.

Известно, что ток проводимости ( $I_{пр}$ ) в материальных средах в общем случае состоит из активной и реактивной составляющих:

$$I_{пр} = I_{пр}^a + I_{пр}^p,$$

где

$$I_{пр}^a = I_{св} + I_{ап};$$

$I_{св}$  – ток проводимости, обусловленный свободными зарядами, практически не зависящий от частоты ( $\omega$ ):

$$I_{св} = f(U);$$

$I_{ап}$  – активный ток проводимости, обусловленный связанными зарядами (диэлектрическими потерями), зависящий от частоты и свойств диэлектрика ( $\varepsilon$ ):

$$I_{ап} = f(U, \varepsilon, \omega);$$

$I_{пр}^p$  – реактивный ток проводимости (ток смещения), обусловленный связанными зарядами, зависящий от частоты и свойств диэлектрика ( $\varepsilon$ ):

$$I_{пр}^p = f(U, \varepsilon, \omega);$$

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость (ДП).

Для металлов и полупроводников:

–  $I_{св}$ , обусловленный свободными зарядами, значительно больше составляющих  $I_{пр}^a$  и  $I_{пр}^p$ ;

– значение  $I_{пр}^a$  на переменном токе практически равно значению  $I_{пр}$  на постоянном токе.

Для диэлектриков, наоборот, ток, обусловленный свободными зарядами, составляет небольшую часть. Реактивная составляющая тока проводимости ( $I_{пр}^p$ ), зависящая от свойств материала, превышает значение  $I_{пр}^a$ . Поэтому для оценки свойств диэлектриков и введена характеристика – тангенс угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ), равный отношению активного тока ( $I_{пр}^a$ ) к реактивному ( $I_{пр}^p$ ):

$$\operatorname{tg}\delta = I_{пр}^a / I_{пр}^p.$$

Учитывая, что

$$I_{пр}^a = I_{св} + I_{ап},$$

$$I_{пр}^p = I_{пр},$$

получим

$$\operatorname{tg}\delta = (I_{св} + I_{ап}) / I_{пр}.$$

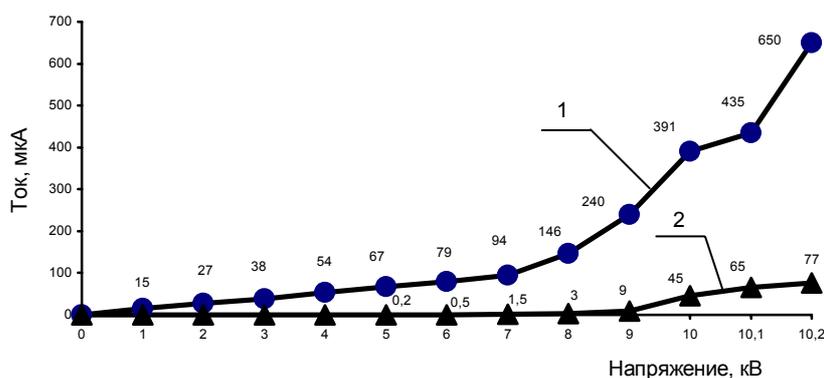
Для выявления причин повреждений ОПН и уточнения представлений о свойствах ОПН проведены испытания ОПН 6-220 кВ.

Первоначально проведены испытания ОПН 6 кВ и получены значения следующих параметров:  $R$ ; вольт-амперные характеристики (ВАХ) на постоянном и переменном токе; емкости на частотах 2 и 50 Гц;  $\operatorname{tg}\delta$  в зависимости от  $U_{исп}$ ;  $I_{пр}^a$  по методу компенсации емкостной составляющей.

В процессе испытаний были получены следующие зависимости:

- $I_{пр}$  от постоянного напряжения  $U_{исп}^-$ ;
- $I_{пр}^a$  от переменного напряжения  $U_{исп}^-$  частоты 50 Гц.

Анализ и сопоставление этих зависимостей (см. рисунок) показывает, что при амплитудных значениях  $U_{исп}^-$ , равных  $U_{исп}^-$  (при равных мгновенных значениях переменного и соответствующего постоянного напряжений), амплитуда  $I_{пр}$  на  $U_{исп}^-$  значительно выше соответствующей величины  $I_{пр}$  при  $U_{исп}^-$ . Это означает, что ток  $I_{пр}^a$  обусловлен, прежде всего, связанными зарядами, т.е. диэлектрическими потерями.



Сравнительные значения токов проводимости ОПН при постоянном и переменном напряжении: 1 – переменное напряжение; 2 – постоянное напряжение

При измерении емкостных характеристик установлено, что разность емкостей на частотах 2 и 50 Гц равна нулю. Измеренная абсорбционная емкость равна 60 пФ. Емкость, измеренная при частоте 50 Гц, примерно равна 220 пФ, что существенно больше геометрической емкости ОПН. Отсюда можно сделать вывод, что при  $U_{исп}^=$  ток, протекающий через ОПН, состоит из тока утечки ( $i_y$ ) через изоляцию и тока, проходящего через варисторы, по физической природе и величине соответствующего  $i_y$  диэлектрика.

При начальных значениях  $U_{исп}$  ток состоит только из  $i_y$  через изоляцию. То есть ОПН для постоянного тока представляет собой диэлектрик, при этом ток утечки  $i_y$  может образовываться как за счет  $R$ , так и за счет изоляционных материалов конструкции ОПН.

При подаче  $U_{исп}^-$  были замерены:  $I_{пр}$ ; амплитуда  $I_{пр}^a$ ;  $tg\delta$ ; емкость ОПН. При этом выявлено, что при подаче напряжения окончательное значение  $I_{пр}$  устанавливается не сразу. Разность между значениями  $I_{пр}$  в первый момент после подачи напряжения и его установившимся значением достигает 20–30 мкА. При снижении  $U_{исп}$  также наблюдается разность между значениями  $I_{пр}$  в первый момент и его установившимся значением.

Установлена идентичность динамики изменения амплитуды  $I_{пр}^a$  и  $tg\delta$  у всех измеряемых ОПН. Соотношение между амплитудой  $I_{пр}^a$ , измеренной по осциллографу, и действующим значением  $I_{пр}^a$ , определенным по  $tg\delta$ , составляет 3:1.

При проведении испытаний ОПН 110–220 кВ закономерности, характерные для ОПН 6 кВ, качественно подтвердились. В частности, было выявлено, что при подаче  $U_{исп}^=$ , равного 20–25 кВ, у всех испытуемых ОПН, не имеющих дефектов,  $I_{пр} = 0$ .

При испытаниях ОПН 110–220 кВ выявлено:

- по анализу термограмм наличие прямой зависимости между величинами  $R$ ,  $tg\delta$  и степенью нагрева ОПН;

- значения  $tg\delta$  в пределах одного типа и партии ОПН с нормальными характеристиками имеют незначительный разброс (значительные отклонения величины  $tg\delta$  имелись у дефектных ОПН);

- характеристики элементов многоэлементных ОПН 220 кВ и одноэлементных ОПН 110 кВ одного типа и производителя совпадают;

- параметры величин  $R$ ,  $tg\delta$ , емкость,  $I_{пр}$  при  $U_{исп}^=$  и при  $U_{исп}^-$  у одноэлементных ОПН 220 кВ также совпадают.

Анализ зависимостей емкости и  $tg\delta$  от переменного  $U_{исп}^-$  с учетом материала корпуса (табл. 1) показал, что  $tg\delta$  зависит от материала корпуса ОПН.

В ходе измерений исследуемых ОПН 110–220 кВ было установлено:

- исправные ОПН при подаче  $U_{исп}$  в диапазоне от 0 до наибольшего длительно допустимого  $U_{раб}$  имеют ярко выраженные характеристики изолятора (диэлектрика);

- все исправные ОПН имеют  $R > 10000$  МОм;

- $I_{пр}$  состоит из емкостной составляющей;

- доля  $I_{пр}^a$  менее 10 %;

- $I_{пр}^a$  обусловлена в основном диэлектрическими потерями;

- собственная электронная проводимость близка к нулю в начале диапазона и незначительна при максимальном  $U_{исп}$ ;

- зависимость  $tg\delta$  от  $U_{исп}$  повторяет зависимость изменения амплитуды  $I_{пр}^a$  от  $U_{исп}$ ;

- зависимости  $I_{пр}$ ,  $I_{пр}^a$ ,  $I_{пр}^p$  и  $tg\delta$  от  $U_{исп}$  являются нелинейными;

- при наибольшем длительно допустимом напряжении ОПН нагрева у исправных ОПН не наблюдалось;

- нагрев возникает у ОПН с повышенным уровнем величин  $tg\delta$  и  $I_{пр}^a$ .

Таблица 1. Параметры ОПН 110 кВ, полученные при испытании

Материал корпуса	Параметр	Напряжение, кВ							
		2	5	10	20	30	40	50	60
Полимерный	Емкость, пФ	9,75	9,82	9,94	9,95	9,96	9,97	9,99	10,13
	tgδ, %	12,9	13,6	13,8	13,9	14,4	15,0	16,0	17,8
Фарфоровый	Емкость, пФ	32,9	32,8	32,7	32,4	31,5	30,6	29,9	29,2
	tgδ, %	3,8	3,9	4,0	4,2	4,6	5,0	5,7	6,4

Известные свойства материала НС [1] и результаты измерений подтверждают правильность представлений об ОПН, который представляет собой набор варисторов, количество которых рассчитано на соответствующее  $U_{раб}$ , и имеет вольт-амперную характеристику (ВАХ), согласованную с защищаемым оборудованием. ВАХ принципиально имеет три участка: *первый* обусловлен емкостной проводимостью и активной проводимостью (за счет термоэлектронной проводимости и диэлектрических потерь в межкристаллической прослойке (МКП)); *второй* – обусловлен в основном туннельным эффектом в МКП и *третий* – собственной проводимостью оксида цинка.

Материал варистора по структуре состоит из кристаллов оксида цинка и МКП из оксидов различных металлов с добавками. МКП и определяет свойства ОПН. МКП, подобно оксиду цинка, является полупроводниковым материалом, но с более низкой проводимостью (меньше на несколько порядков) и более широкой запрещенной энергетической зоной. При этом в диапазоне изменения приложенного напряжения от 0 до  $U_{исп}$  варистор имеет ярко выраженные свойства нелинейного диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ), имеющей порядок, как у сегнетоэлектриков. То есть электронная и тепловая проводимости варисторов в диапазоне 0– $U_{исп}$  практически полностью отсутствуют. Сам нелинейный резистор ОПН при  $U_{раб}$  имеет характеристики изолятора, у которого превалирует емкостной характер проводимости. Отсюда

следует, что составляющая  $I_{пр}^a$  при  $U_{исп}$  и ниже обусловлена, прежде всего, диэлектрическими потерями материала.

В диапазоне от 0 до  $U_{исп}$  ток  $I_{пр}$  состоит из емкостной составляющей, так как за счет значительной диэлектрической проницаемости емкость варистора превышает емкость других конструкций ОПН.

Анализируя результаты проведенных многочисленных испытаний, материалы исследований реальных повреждений ОПН и учитывая физические свойства материала нелинейных резисторов, можно указать причины выхода их из строя (табл. 2).

При повреждении варистора, сопровождающегося пробоем МКП (при термоэлектрической перегрузке), растут пропорционально как активная, так и реактивная составляющие  $I_{пр}$ . Браковка возможна по величине  $I_{пр}$ , и выделение  $I_{пр}^a$  не целесообразно.

При изменении внутренней структуры варистора без пробоя МКП (например, при старении) происходит рост  $I_{пр}^a$  без изменения других свойств. В этом случае браковка ОПН производится только по  $I_{пр}^a$ . Величина  $I_{пр}$  практически не меняется. Не происходит существенного изменения  $I_{пр}$  при появлении  $i_y$ , значение которого меньше  $I_{пр}$ , связанного с тем, что фаза угла  $I_{пр}$  сдвинута по отношению к  $I_{пр}^a$  примерно на  $90^\circ$ .

Повреждения ОПН вызывают последствия, в результате которых происходит выход ОПН из строя (табл. 3).

Таблица 2. Возможные причины и последствия неисправностей ОПН

Неисправность	Последствия для ОПН
Разгерметизация корпуса	Под действием влаги, попавшей внутрь корпуса, происходит ухудшение свойств оксида цинка. Под действием $U_{раб}$ увеличивается $I_{пр}$ , нарушается термическая устойчивость ОПН, происходит прожиг дисков R с последующим их расплавлением и разрушением ОПН от короткого замыкания
Некачественный изоляционный материал	Под действием электрического поля, создаваемого $U_{раб}$ , возникают поверхностные $i_y$ , от которых происходит разложение изоляционного материала с появлением проводящих и полупроводящих дорожек и последующим ростом $i_y$ , которые ведут к перекрытию конструкций внутри корпуса и разрушению ОПН
Несоответствие параметров ОПН (энергоёмкость) фактическим воздействиям в месте установки	Импульсы с энергией и токами, превышающими предельные значения, являются разрушающими. При этом повреждение может проявиться не сразу. Происходит частичное внутреннее разрушение структуры материала нелинейного R, из-за чего термическая устойчивость уменьшается, а проводимость возрастает. Происходит постепенное возрастание $I_{пр}$ и при наступлении термической неустойчивости – разрушение ОПН
«Старение» – постепенное изменение свойств при эксплуатации	Под воздействием нормальных, расчетных значений $U_{раб}$ и допустимых импульсов происходит ухудшение характеристик ОПН, что приводит к термической неустойчивости. В настоящее время выпускаются варисторы, устойчивые к «старению»
Механические повреждения и дефекты	Неплотное прилегание поверхностей деталей при сборке, нарушение контактов между элементами, зазоры и т.д. При этих дефектах возникают частичные разряды и искровые процессы, разрушающие варисторы и изоляцию

Таблица 3. Виды повреждений и их влияние на параметры ОПН

Повреждение	Процесс и последствия
Разгерметизация и увлажнение	На начальной стадии разгерметизации снижается R без изменения других показателей. Большая степень увлажнения влияет на величину $I_{пр}^a$ и связанного с ней $tg\delta$ , а также на нагрев ОПН, что приводит к небольшому увеличению $I_{пр}$
Некачественный изоляционный материал	Снижается R и увеличивается $i_y$ , что влияет на величину $tg\delta$ . При этом $I_{пр}$ может не измениться
Старение материала НС	Приводит к увеличению $I_{пр}^a$ , $tg\delta$ и нагреву ОПН. $I_{пр}$ и R могут не меняться до момента, когда начнется лавинообразный процесс разогрева ОПН с последующим его разрушением
Перегрузки и толчковые воздействия	Могут привести к разрушению внутренней структуры ОПН. Вместе с $I_{пр}^a$ будет возрастать и $I_{пр}$ . При этом R может также оставаться более 10000 МОм. Не изменится и $tg\delta$ , но будет нагрев ОПН
Наличие механических повреждений или плохого контакта	Происходит кажущееся возрастание $I_{пр}$ за счет наличия искровых нестационарных процессов. При этом осциллограмма покажет нестационарный процесс или наличие частичных разрядов. Сопротивление при этом будет в норме, а определение $I_{пр}^a$ и $tg\delta$ будет затруднено. Нагрева в этом случае может и не наблюдаться

Значение  $I_{пр}^a$  при  $U_{исп}$  обусловлено, прежде всего, диэлектрическими потерями материала варистора, сравнительно небольшой составляющей его электрической проводимости и  $i_y$ . Диэлектрические потери определяют основную часть тока  $I_{пр}^a$ , порядок которого составляет 5–10% от  $I_{пр}$ .

Поэтому по  $I_{пр}^a$  можно определить начальную стадию процесса увлажнения, термоэлектрическое повреждение, старение варисторов, повреждение и дефекты изоляционных материалов.

Отдельные виды неисправностей ОПН можно выявить по его параметрам (табл. 4).

Учитывая вышеприведенное, можно отметить, что каждый нормируемый параметр ОПН может выявить только отдельные виды дефектов.

Оценка технического состояния ОПН на основе учета совокупности различных параметров определяет полноту и эффективность диагностирования. Например, если выделение  $I_{пр}^a$  из  $I_{пр}$  при контроле ОПН представляет определенные технические трудности, то тепловизионный контроль позволяет выделить неисправные ОПН. Однако тепловизионный контроль надежно дает только качественную оценку. Но поскольку рост  $I_{пр}^a$  и нагрев ОПН связан с ростом  $tg\delta$ , надежную браковку можно

дать при использовании одновременно результатов измерения  $tg\delta$  и снятия термограмм. Наличие же механических повреждений (трещин, пустот, зазоров между деталями) при некачественной сборке можно выявить только по наличию частичных разрядов.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать заключение: существующие в настоящее время методы нормирования некоторых параметров не позволяют полностью выявлять весь перечень возможных дефектов ОПН, имеющих различную физическую природу.

Поэтому при диагностировании не всегда делаются правильные выводы о состоянии и причинах возникновения дефектов, что затрудняет определение и прогнозирование технического состояния ОПН.

Браковка ОПН по минимальному числу параметров уменьшает надежность заключения по результатам испытания, так как любой отдельный параметр не может отразить наличие всех возможных видов дефектов, которые могут возникнуть (возможные сценарии процесса возникновения неисправностей при исследовании ОПН см. в табл. 5).

Таблица 4. Параметры, позволяющие идентифицировать дефекты и неисправности ОПН

Параметр	Определяемые неисправности
Сопротивление (R)	Увлажнение, некачественная изоляция, изменение свойств материала варистора ОПН. При испытании напряжением 2500 В можно выявить наличие $i_y$ , то есть оценить качество конструктивных изоляционных материалов ОПН. При этом варистор без дефектов дает величину $R > 10000$ МОм. Снижение R указывает либо на ухудшение свойств варистора, либо на снижение изоляционных свойств конструктивных материалов
Ток проводимости ( $I_{пр}$ )	Увлажнение на поздней стадии, когда существует непосредственная угроза разрушения ОПН, разрушение внутренней структуры при перегрузках, сильное термоэлектрическое повреждение, а также повреждения, развивающиеся при увлажнении, быстрое старение варисторов, повреждения и дефекты изоляционных материалов
Активная составляющая тока проводимости ( $I_{пр}^a$ )	Увлажнение, ухудшение свойств изоляционных материалов, термическое разложение изоляции на более ранней стадии, старение и разрушение внутренней структуры материалов, увеличение $i_y$
Тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ )	Увеличение тока $I_{пр}^a$ в результате увлажнения, увеличения $i_y$ , старения и разрушения внутренней структуры материала, термического разложения материалов
Термограмма	Возрастание $I_{пр}^a$ и $i_y$ . Распределение температуры по зонам определяет причины возрастания $I_{пр}^a$
Наличие частичных разрядов	Существование зазоров, в том числе и между деталями, из-за некачественной сборки, трещин, плохих контактов и других механических дефектов и повреждений

Таблица 5. Возможные сценарии процесса возникновения неисправностей при исследовании ОПН

Сценарий	Происходящие процессы и результат
1	Появлении дефекта в начальной стадии его образования, несмотря на необратимость его развития, параметр, на который влияет данный вид дефекта, может не достичь браковочного значения, и поэтому существует опасность того, что аппарат, имеющий дефект в начальной стадии, забракован не будет. То есть в эксплуатацию будет принят аппарат, который через какое-то время работы неизбежно повредится
2	Под действием внешних факторов произошло снижение величины нормируемого параметра, не влияющего на работоспособность аппарата (например, уменьшение сопротивления внешней изоляции от загрязнения), и будет забракован исправный аппарат
3	По снижению сопротивления можно судить о наличии влаги или других изменениях технического состояния ОПН, однако снижение сопротивления может не достигнуть величины менее 3000 МОм, при которой необходимо ОПН браковать

Надежное определение технического состояния ОПН возможно при измерении необходимого и достаточного количества показателей, отражающих физические стороны различных дефектов, и их сопоставлении.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. ОПН имеет характеристики диэлектрика при напряжении, не превышающем значение длительно допустимого рабочего напряжения, поэтому для проведения качественного диагностирования можно использовать методы для исследования диэлектриков, например, измерение  $\text{tg}\delta$ , температуры, раздельно активной и емкостной составляющей  $I_{\text{пр}}$ , емкости ОПН.

2. Величина  $\text{tg}\delta$  изменяется пропорционально  $I_{\text{пр}}^a$  или  $i_y$ , то есть пропорционально активной энергии, выделяющейся внутри ОПН и ведущей к его нагреву. Поэтому данную характеристику наряду с измерением температуры и  $I_{\text{пр}}^a$  рекомендуется использовать для повышения эффективности диагностирования.

3. Каждый отдельно взятый параметр не может отразить все стороны технического состояния ОПН и все физические процессы, по которым можно с достаточной надежностью дать заключение о пригодности ОПН к эксплуатации, так как не может охватить весь перечень возможных дефектов. Следовательно, при диагностировании ТС ОПН имеется вероятность ошибки или необъективной оценки.

4. Наиболее объективный результат при диагностировании можно получить только по максимальному количеству исследований различных параметров ОПН.

В том случае, когда в результате исследований получены значения параметров с от-

клонениями от нормируемых величин, но при этом ни один из этих параметров не достиг браковочного значения (например, на ранней стадии), принимать решение о пригодности ОПН необходимо только по результатам комплексного диагностирования.

5. Дефектный ОПН можно определить: по параметрам  $R$ ;  $I_{\text{пр}}$ ;  $I_{\text{пр}}^a$ ;  $\text{tg}\delta$ ; температуре нагрева по поверхности корпуса аппарата; с помощью методов, позволяющих выявить наличие внутренних разрядов; по изменению характеристик в течение определенного промежутка времени при наибольшем длительно допустимом  $U_{\text{раб}}$ .

Применение различных методов для проведения диагностирования ОПН позволит повысить полноту и качество оценки ТС при принятии решения о пригодности ОПН к эксплуатации.

### Список литературы

1. **Перенапряжения** и надежность эксплуатации электрооборудования. Вып.1. Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производства, испытаний и применения ОПН: Мат-лы междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: ПИЭПК, 2001.
2. **Дмитриев М.В.** Методика выбора ОПН для защиты оборудования сетей 110–750 кВ от грозových и внутренних перенапряжений: Автореф. дис... канд. техн. наук. – СПб, 2006.
3. **Методические** указания по применению ограничителей в электрических сетях 110–750 кВ / РАО «ЕЭС России». – М., 2000.
4. **Руководство** по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / РАО «ЕЭС России». – СПб.: ПИЭПК, 1999.
5. **Методические** указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6–35 кВ. – М., 2001.
6. **Объем** и нормы испытания электрооборудования. Изд. 6 / РАО «ЕЭС России». – М., 1998.
7. **Перенапряжения** и надежность эксплуатации электрооборудования. Вып. 3: Мат-лы междунар. науч.-техн. конф. – Минск – СПб.: ПЭИПК, 2004.

Мисриханов Мисрихан Шапиевич,  
МЭС Центра – филиал ОАО «ФСК ЕЭС»,  
генеральный директор, доктор технических наук, профессор,  
телефон (495) 963-47-17,  
e-mail: mms@mes-centra.ru

Гречин Владимир Павлович,  
филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС,  
кандидат технических наук, главный специалист,  
телефон 8-903-849-01-59.

Путова Татьяна Евгеньевна,  
ОАО «Инженерный центр» (г. Нижний Новгород),  
Начальник сектора по перенапряжениям,  
телефон 8-904-399-72-12.

Малюшицкий Павел Григорьевич,  
ОАО «Инженерный центр» (г. Нижний Новгород),  
инженер,  
телефон 8-904-399-72-12.