

Влияние загрязнений на поверхности внешней изоляции на достоверность оценки состояния ОПН при периодических обследованиях

Дмитриев В.Л. (ЗАО «Завод энергозащитных устройств»)

За свою более чем двадцатилетнюю историю существования ОПН получили достаточно широкое распространение в энергосистемах и проявили себя в эксплуатации с наилучшей стороны. Известные случаи негативного опыта применения ОПН связаны, в основном, с непониманием того, что ограничитель перенапряжений, выполняющий ту же функцию что и устанавливаемый в сетях на то же место разрядник, и отличается от последнего по условиям применения существенным образом. В результате этого непонимания появлялись и появляются проекты, в которых указываются характеристики ОПН, неадекватные условиям эксплуатации, вследствие чего аппараты повреждаются из-за превышения допустимых для выбранного аппарата воздействий в процессе эксплуатации. О состоянии нормативной документации, регламентирующей выбор характеристик ОПН, соответствующих конкретным условиям эксплуатации, накоплено уже достаточно много публикаций. Заметно меньше литературы имеется по вопросам диагностики ОПН в эксплуатации.

Диагностика ОПН

Смысл диагностики оборудования вообще, и ОПН в частности, состоит в том, чтобы выявить на ранних стадиях возникшие дефекты, развитие которых может привести к аварии.

Как известно, ограничитель перенапряжений представляет собой колонку последовательно включенных нелинейных сопротивлений – варисторов (или несколько таких колонок включенных параллельно для увеличения допустимых нагрузок ОПН по току, называемых пропускной способностью). Колонка варисторов размещается в герметичном корпусе, предотвращающем воздействие неблагоприятных атмосферных факторов на варисторы. В качестве материала для изготовления корпуса используется как фарфор, так и композитные полимерные материалы. Основные размеры корпуса ОПН выбирают исходя из необходимых электрической прочности и длины пути утечки внешней изоляции.

При приложении к ОПН напряжения через него протекает ток проводимости, имеющий активную и емкостную составляющие. Емкостная составляющая является главной составляющей, а активная составляющая по амплитуде обычно не превосходит 10 – 15% величины полного тока проводимости. Наличие активной составляющей тока проводимости приводит к выделению в ОПН тепла, которое через корпус ОПН отдается в окружающее пространство. Увеличение активной составляющей тока сверх нормальной величины приводит к дополнительному разогреву колонки варисторов и, как следствие, корпуса. При достаточно большом увеличении активной составляющей тока, когда корпус оказывается неспособным отводить все тепло

в окружающее пространство, варисторы ОПН разогреваются, вследствие чего может возникнуть тепловой пробой варисторов, т.е. повреждение аппарата.

Очевидно, что основной задачей диагностики ОПН является определение того, возросла ли величина активной составляющей тока и не достигла ли она в конкретном обследуемом ОПН опасного значения, превышение которого чревато возникновением аварийной ситуации. На практике эта задача решается либо непосредственным измерением токов проводимости, либо косвенно – контролем температуры поверхности корпуса ОПН путем тепловизионного обследования, либо путем последовательного использования обоих методов. В этом случае измерение тока проводимости проводится только на аппаратах у которых при тепловизионном обследовании выявлена аномальная температура поверхности корпуса.

В нормативной документации [1] указано на необходимость проводить в процессе эксплуатации перед началом грозосезона периодическое обследование состояния ОПН (в сетях с номинальным напряжением 110 кВ и выше) путем измерения тока проводимости. Помимо измерения тока проводимости, допускается проводить тепловизионное обследование, причем в случае удовлетворительных результатов тепловизионного обследования, согласно [1], иное испытание не требуется. Помимо этих двух основных методов, в качестве дополнения, предписано не реже чем 1 раз в 6 лет проводить измерение сопротивления при проведении плановых работ на защищаемом оборудовании.

В процессе решения задачи диагностики состояния ОПН необходимо сделать четыре шага:

- выбрать адекватный метод контроля;
- корректно выполнить измерения в соответствии с выбранным методом контроля и занести все необходимые данные в протокол;
- провести анализ полученных результатов, в том числе, оценить достоверность полученных результатов;
- сделать на основе результатов анализа вывод о состоянии обследуемого аппарата или необходимости проведения дополнительных испытаний.

При кажущейся очевидной последовательности действий в проведении диагностики, в полном объеме эти четыре шага прodelываются далеко не всегда, и, как следствие, выводы в протоколах не подтверждаются приведенными в протоколах результатами измерений.

Измерение сопротивления

Самым простым из предусмотренных [1] испытаний является измерение сопротивления и обычно здесь недоразумений не бывает. Единственной неувязкой является требование проводить измерение: *"на разрядниках и ОПН с номинальным напряжением менее 3 кВ — мегаомметром на напряжение 1000 В"* (п 21.1) [1]. В соответствии с принятой для ОПН терминологией, «номинальное напряжение ОПН» – это напряжение которое ОПН должен выдерживать в течение не менее 10 сек при проведении испытаний в рабочем

режиме. Как правило, для ОПН отечественных изготовителей номинальное напряжение приблизительно в 1,25 раза больше наибольшего допустимого напряжения аппарата (желающие могут проверить это соотношение в каталогах любых отечественных или зарубежных фирм). Таким образом, требование [1] распространяется на аппараты с наибольшим рабочим напряжением не более 2,4 кВ, а фактически – на аппараты для сетей 220/380/600 В. Однако приложение к ОПН для сетей 220/380/600 В в течение 1 мин напряжения 1000 В (согласно методике измерения сопротивлений мегаомметром) неминуемо приведет к повреждению варисторов ОПН, что легко проверить по приводимым изготовителями зависимостям "напряжение-время" для этих аппаратов. Единственным выходом из этой ситуации, учитывая обязательность требований [1], является корректировка формулировки этого пункта.

Измерение тока проводимости

Заметно более сложным, чем предыдущее, является измерение тока проводимости ОПН. Обычно эти измерения выполняют на месте эксплуатации, при воздействии на ОПН фактического напряжения сети (без отключения оборудования). Для измерения величины тока в цепь заземления ОПН включают измерительное устройство. Используемые при этом средства измерений тока проводимости можно условно разделить на три основных группы:

1. миллиамперметры, измеряющие амплитудное или действующее значение полного тока проводимости;
2. устройства, позволяющие регистрировать помимо полного тока, токи 1-ой и высших гармоник (обычно – 3-ей, 5-ой, 7-ой);
3. устройства, обеспечивающие измерение не только характеристик, перечисленных в предыдущей группе, но и активной составляющей полного тока проводимости.

Широкое применение при обследованиях измерительных устройств первой группы обусловлено их существенно меньшей стоимостью по сравнению с приборами остальных групп. По сути, в первой группе речь идет об обычных микроамперметрах (миллиамперметрах) с пределами измерений 1-5 мА (в зависимости от характеристик обследуемого аппарата). Практически с помощью микроамперметра выявить изменения характеристик варисторов невозможно, поскольку даже значительное (в разы) изменение величины активной составляющей (в силу ее относительной малости) не приводит к сколько-нибудь заметным изменениям полного тока. Увеличение полного тока вследствие увеличения активной составляющей (возникшего, например, из-за изменения характеристик варисторов ОПН) могло бы быть замеченным лишь при значительном росте активной составляющей. Однако при столь большой величине активной составляющей тока вследствие теплового пробоя ОПН неминуемо в течение часов (или даже минут) будет поврежден. Как видно, периодический контроль полного тока в ОПН не позволяет прогнозировать повреждение ОПН.

Регистрируемые при обследованиях изменения полного тока проводимости в ОПН следует связывать:

- с изменениями условий измерений (величина и синусоидальность приложенного к аппарату напряжения, температура окружающей среды);
- с изменениями в состоянии изоляции ОПН;
- с изменением рабочей высоты колонки варисторов в аппарате (например, вследствие пробоя части варисторов, или потери электрического контакта в колонке).

Появление у разных изготовителей нескольких типов измерительных устройств второй группы было обусловлено низкой информативностью результатов измерений с помощью устройств первой группы, не позволяющих выявить начавшийся процесс деградации варисторов. Устройства второй группы – это уже приборы, способные выделить из тока гармонические составляющие и измерить их величины. В основе диагностики ОПН с помощью приборов этой группы лежит два основных фактора. Наличие в электрической цепи нелинейного элемента приводит к появлению в ней сигналов с более широким спектром частот, чем исходный синусоидальный. Нелинейность ОПН неодинакова в разных областях вольтамперной характеристики, причем в области рабочих напряжений нелинейность мала, а по мере роста приложенного напряжения нелинейность возрастает. Таким образом, рост токов высших гармоник в цепи заземления ОПН при неизменном полном токе свидетельствует об изменении характеристик нелинейного элемента. При использовании таких устройств следует иметь в виду:

- как будет показано ниже, нелинейными свойствами в ОПН обладают не только варисторы;
- появление высших гармонических составляющих в сетевом напряжении (т.е. приложенном к ОПН) в значительно большей степени сказывается на величинах токов соответствующих гармоник, чем на величине полного тока.

Измерение величин токов высших гармоник, в конечном счете, позволяет выявить наличие изменений в вольтамперной характеристике ОПН, но не дает возможности измерить собственно активную составляющую тока проводимости, которая и определяет состояние варисторов. Следовательно, по-прежнему остается открытым вопрос, что явилось причиной роста тока высших гармонических составляющих (деградация варисторов, появление высших гармоник в сети и т.п.). Устройства, относящиеся к третьей группе, т.е. измеряющие непосредственно активную составляющую тока проводимости, только начали появляться на отечественно рынке измерительной техники. Опыт применения опытных образцов таких устройств, весьма успешный, составляет всего несколько лет.

Следует обратить внимание на то, что измерительное устройство, к какой из трех перечисленных групп оно бы не относилось, включается в цепь заземления всего защитного аппарата ОПН, а не только колонки варисторов.

Иными словами, через измерительное устройство будет проходить суммарный ток, протекающий как по колонке варисторов, так и по корпусу, в том числе, по его наружной поверхности.

Суммарный ток через ОПН при приемочных испытаниях на заводе измеряется на аппарате с чистой поверхностью, когда величина тока утечки по поверхности корпуса несоизмеримо меньше, чем ток через колонку варисторов. Иное дело – величина тока по поверхности с увлажненным слоем загрязнений на аппарате, отстоявшем в условиях эксплуатации год и более. Публикаций, посвященных исследованиям токов утечки по поверхности изоляции, находящейся под рабочим напряжением мало, так как исследователей больше интересовали вопросы разрядных характеристик. Из опубликованных данных [2] видно, что при приложении синусоидального напряжения к загрязненному изолятору, по его поверхности начинает протекать заметно несинусоидальный ток. Специалистами ОАО "НИИПТ" при обсуждении влияния загрязнений изоляции ОПН на результаты измерения тока проводимости ОПН экспертно указывался возможный диапазон величин токов утечки по поверхности 0,4-1,0 мА.

В лаборатории ЗАО "Завод энергозащитных устройств" была проведена серия экспериментов с ОПН 110 кВ после его годичной эксплуатации на одной из подстанций ОАО "Вологдаэнерго". По-возможности предохраняя от повреждений слой естественного загрязнения на поверхности корпуса, аппарат был помещен на 1 час в ванну с водой, после чего ОПН был перенесен на испытательный стенд, где был измерен суммарный ток со стороны заземляемого фланца при воздействии рабочего напряжения. Действующее значение тока составило 1,5 мА, что заметно превышает браковочное значение для ОПН испытывавшегося типа. После выдержки в течение суток в сухом помещении, суммарный ток через аппарат при том же напряжении составил уже 0,4 мА, что соответствовало результатам измерений при приемо-сдаточных испытаниях, приведенных в паспорте на ОПН. После повторного увлажнения водопроводной водой поверхности корпуса (с помощью бытового опрыскивателя) регистрируемая величина тока снова выросла, но уже до 1,1 мА. Затем поверхность ОПН была вымыта с помощью мягкой щетки с применением обычного моющего средства и последующим ополаскиванием обычной водопроводной водой. После обмыва, вне зависимости от того, применялось ли увлажнение поверхности корпуса, суммарный ток через ОПН составлял 0,4 мА. Полученный результат подтверждает давно известные факты – загрязненная поверхность изолятора, если она увлажнена, является проводником, причем нелинейным, а ток утечки по этой поверхности при неблагоприятном стечении обстоятельств, может составлять миллиамперы, т.е. применительно к ОПН будет сравним или даже будет превосходить ток проводимости через колонку варисторов.

В настоящее время в конструкциях ОПН практически всех изготовителей отсутствует специальный изолированный от нижнего заземляемого фланца ОПН вывод, подсоединенный к колонке варисторов (рис.1). Такой вывод (небольшой проходной изолятор), изолирующий колонку варисторов от

нижнего фланца ОПН, имелся лишь в аппаратах производства Корниловского завода. Из-за отсутствия такого вывода у большинства современных ОПН, ток через колонку варисторов и ток по поверхности корпуса ОПН замыкаются на фланцы аппаратов, т.е. одновременно протекают в измерительных приборах, и выделить при измерениях только ток через колонку варисторов не представляется возможным. Следовательно, перед измерением тока через ОПН для оценки состояния варисторов необходимо свести к минимуму ток утечки по поверхности аппарата, т.е. проводить измерения при сухом слое загрязнений на поверхности ОПН или после тщательного предварительного обмыва поверхности.

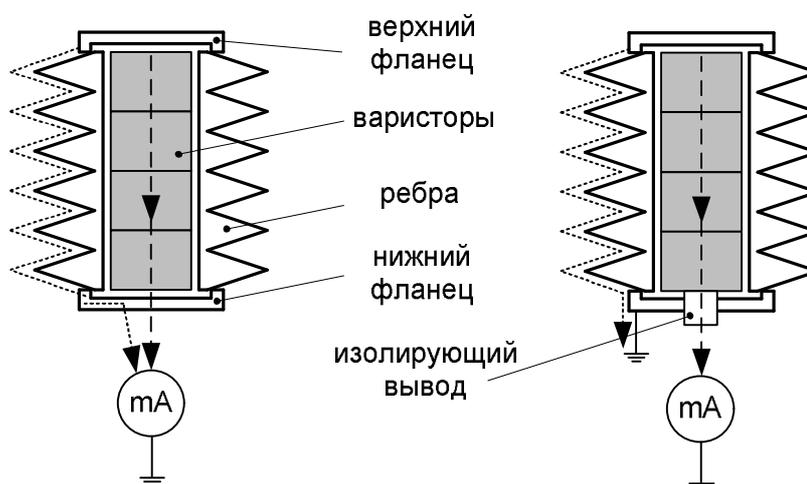


Рис.1. Изолирующий вывод и его предназначение.

В лабораторных условиях для определения доли тока утечки в суммарном токе в цепи заземления ОПН можно провести несложные измерения. На ОПН необходимо одеть металлическое кольцо, разместив его вблизи от нижнего фланца (например, между первым и вторым ребрами, считая от нижнего фланца). Между кольцом и нижним фланцем необходимо приложить напряжение, величина которого должна быть во столько раз меньше нормально воздействующего на весь ОПН, во сколько раз длина пути утечки от кольца до нижнего фланца меньше длины пути утечки изоляции целого ОПН. Если зарегистрированная в этих условиях величина тока утечки существенно меньше ожидаемого тока проводимости варисторов ОПН, можно считать, что при измерениях на полном ОПН ток утечки по поверхности аппарата заметного влияния не окажет.

Тепловизионное обследование

Появление дефектных областей в аппарате приводит, как правило, к изменению (обычно повышению) температуры в зоне дефекта, что в свою очередь соответственно изменяет температуру внешней оболочки аппарата. Рост температуры может быть зафиксирован в процесс тепловизионного обследования, которое в последнее время получает все более широкое распространение.

При обследовании ОПН интерес представляет температура варисторов, т.е. температура поверхности тела ОПН (его цилиндрической части), а не ребер. Дело в том, что температура ребер ОПН, тем более полимерных, мало зависит от температуры тела аппарата, что следует из многочисленных опубликованных работ В.В. Титкова, посвященных тепловым процессам в ОПН. Поскольку тепловизор это оптический прибор, с его помощью можно измерить температуру только тех поверхностей, которые видны. Однако имеющиеся на ОПН ребра частично закрывают собой тело аппарата, причем в разной степени для разных по высоте частей аппарата (см. рис.2). Создаваемые ребрами помехи таковы, что в ряде случаев тела ОПН не видно вовсе (как правило – в части примыкающей к нижнему фланцу). В каждом конкретном случае помехи от ребер зависят от:

- положения наблюдателя;
- угла наклона и вылета ребер (а эти параметры у каждого изготовителя свои).

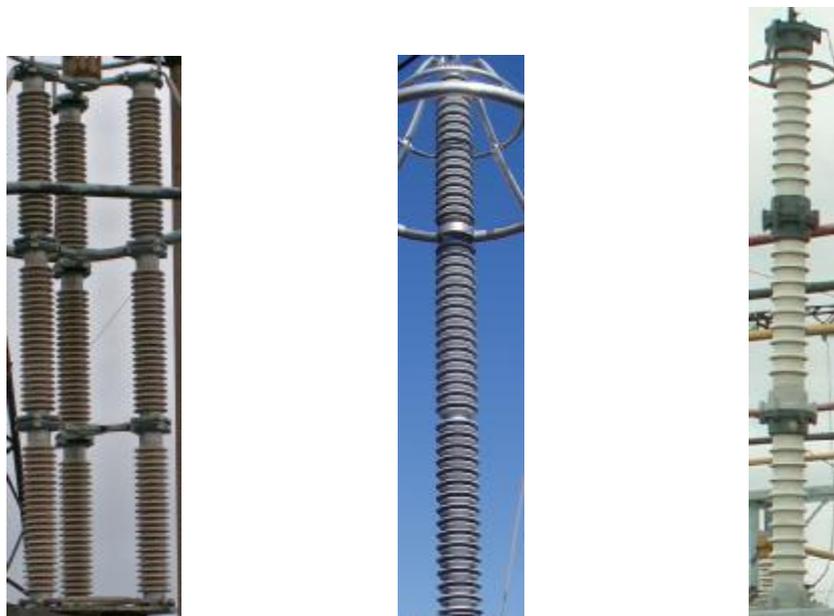


Рис.2. Возможность наблюдения тела у ОПН разных изготовителей при различных вылетах и углах наклона ребер.

Во время тепловизионного обследования нередко не принимают во внимание то, что получаемая «фотография» не имеет четких контуров объектов (см. рис.3). Вместе с тем, отсутствие четкости изображения свидетельствует о том, что измерению подвергся не конкретная точка на объекте, а несколько, по которым оператор может определить лишь усредненную температуру. Неточная настройка тепловизора, его недостаточная разрешающая способность приводят к тому, что зачастую измеряется не температура тела ОПН, а что-то усредненное между температурами тела и ребер (и окружающих предметов), тогда как информативной является лишь температура тела.

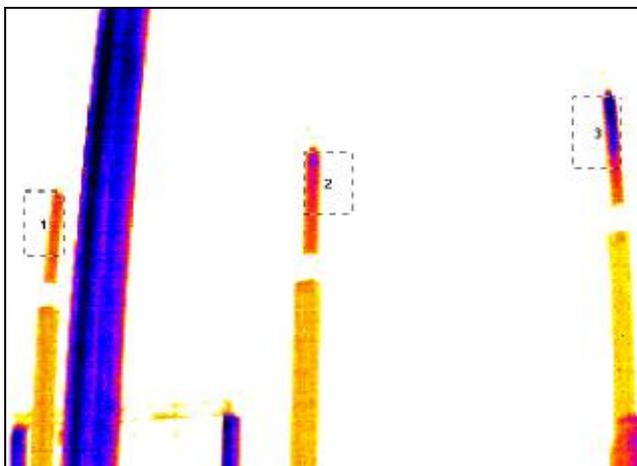


Рис.3. Термограмма ОПН с размытыми контурами обследуемого объекта.

Термограмма рис.3 принципиально не может быть использована для оценки состояния ОПН, однако, нередко именно по таким термограммам эксплуатирующими организациями проводится диагностика состояния ОПН.

На термограмме рис.4, в отличие от рис 3, видны контуры аппарата, и можно легко отличить фрагменты тела ОПН и ребер его корпуса, а следовательно, и их температуры. В протоколе обследования указана максимальная температура на поверхности ОПН, но не отмечено, что эта температура относится к поверхности ребер, а не тела аппарата. Однако, если более внимательно рассмотреть термограмму рис.4, то видно, что самые нагретые области находятся на ребрах ОПН, а совсем не на теле аппарата. Следовательно, главным источником тепла, которое в данном случае регистрирует тепловизор, является не нагрев варисторов ОПН, а ток утечки по поверхности загрязненной увлажненной изоляции. Поскольку нагрев поверхности токами утечки никто во внимание не принимает, а верхняя часть ОПН, "как всем известно, является более перегретой", то верхние варисторы «состарились» и ОПН необходимо выводить из эксплуатации. Однако, нагрев ОПН током утечки по поверхности загрязненной изоляции не является браковочным показателем. Это нормальный расчетный режим ограничителя перенапряжений, т.е. оснований для вывода ОПН из эксплуатации нет.

Более того, вследствие неравномерной проводимости слоя загрязнений на поверхности корпуса (разная загрязненность, увлажнение, проводимости) и различной плотности тока (на теле аппарата и ребрах) нагрев различных частей аппарата током утечки может существенным образом отличаться!

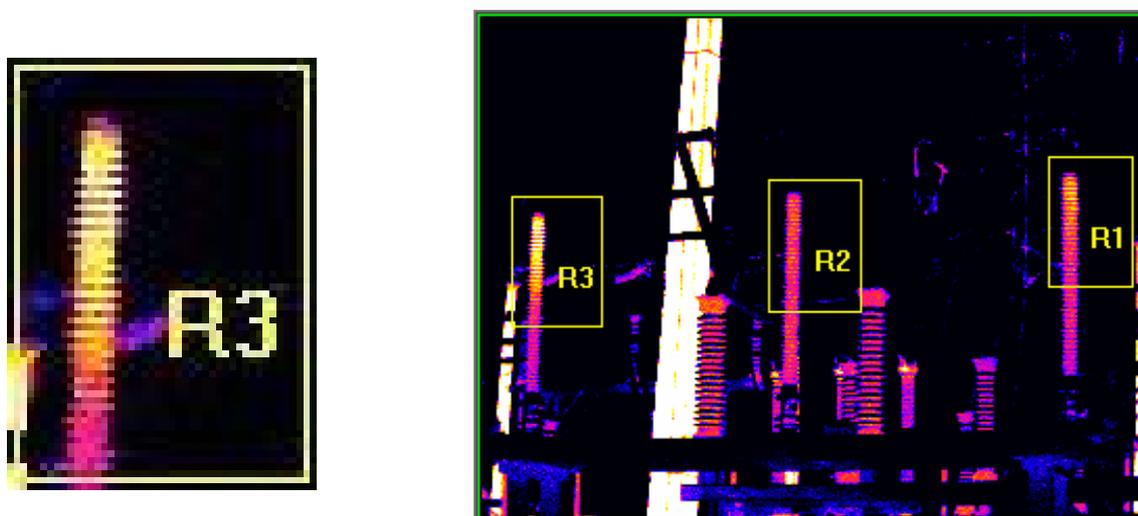


Рис.4. Термограмма ОПН с четкими контурами обследуемого объекта (слева в увеличенном масштабе показана зона R3 аппарата).

В подтверждение влияния токов утечки на результаты обследования ОПН можно привести данные [3]. В этом материале в качестве примера приведены результаты измерений тока утечки по поверхности линейных изоляторов ВЛ 400 кВ и относительной влажности воздуха, выполненные одной из станций мониторинга в Израиле. Этот график показан на рис.5, откуда видно, что ток утечки (красная линия на графике) при типичной для наших регионов относительной влажности (синяя линия на графике) может быть не только сопоставим с током проводимости через варисторы, но и заметно превосходить его. Естественно, что не на всяком эксплуатирующемся ОПН загрязнения таковы, что ток утечки будет сравним с током проводимости. Однако в нашей стране достаточно районов, в которых отмеченная проблема загрязнения поверхности изоляторов не является надуманной.

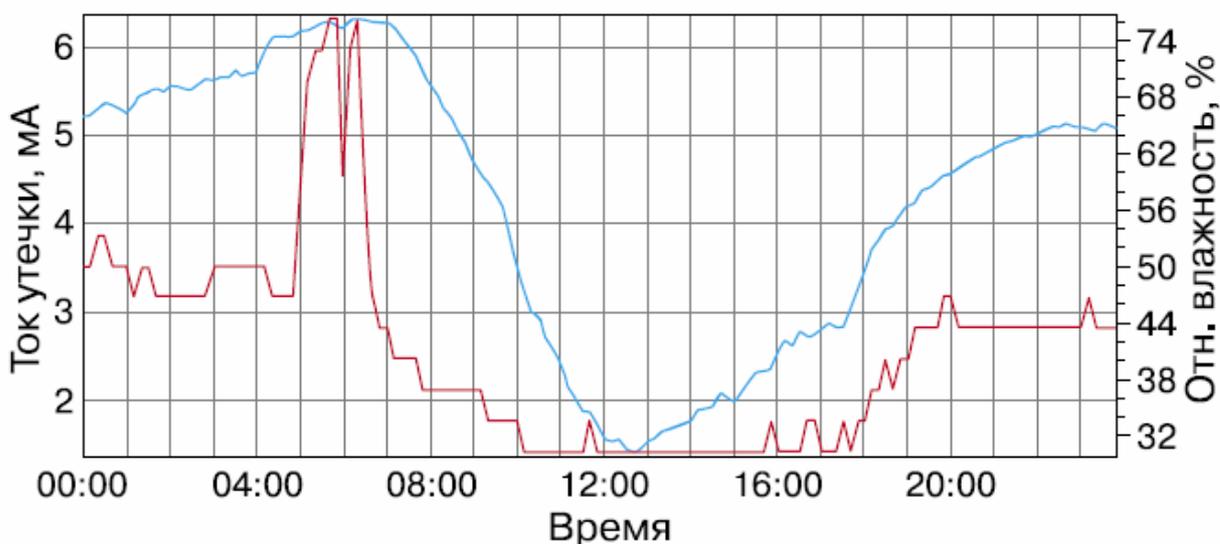


Рис.5. Суточный график изменения относительной влажности и тока утечки, сентябрь 2005, Ein Harod (внутренний сельскохозяйственный район).

Заключение

Обследование ОПН, находящихся в эксплуатации, согласно [1] должно проводиться ежегодно перед началом грозосезона (в марте-апреле). Это время характеризуется резкими сменами температуры и повышенной влажностью загрязненной поверхности изоляции. В подобных условиях оценка состояния ОПН должна производиться только после тщательного анализа достоверности полученных результатов:

- следует помнить, что наличие тока утечки сказывается как на результаты измерения тока через ОПН при рабочем напряжении, так и на тепловую картину аппарата, получаемую с помощью тепловизора. Объективная оценка состояния варисторов ОПН может быть произведена только тогда, когда величина тока утечки, не превосходит 10-15% полного тока через аппарат (т.е., сравнима с активной составляющей тока проводимости варисторов).
- браковочным критерием является повышенный ток в варисторах, а не ток утечки по поверхности загрязненного корпуса;
- при тепловизионном обследовании, необходимо убедиться в том, что измеряется температура тела ОПН (а не ребер) и что регистрируемый нагрев обусловлен, в основном, нагревом варисторов, а не сторонними причинами (например, током по поверхности ОПН).

Эксплуатирующим организациям рекомендуется обратить внимание на следующее:

- ОПН достаточно чувствителен к приложенному напряжению; для корректной оценки состояния ОПН, в том числе по результатам тепловизионного обследования, необходимо знать величину напряжения на аппарате во время измерений, и указывать ее в протоколе;
- воздействующие на ОПН в эксплуатации фазные напряжения, как правило, определяются не прямыми измерениями, а делением на $\sqrt{3}$ величины фиксируемого линейного напряжения; точное определение фазного напряжения через линейное напряжение невозможно, так как всегда имеет место несимметрия по фазам параметров сети и режима.

Литература

1. РД 34.45-51.300-97 "Объем и нормы испытаний электрооборудования".
2. С.Д. Мерхалев, Е.А. Соломоник. "Механизм развития разряда по проводящей увлажненной поверхности изоляторов при длительном воздействии напряжения". Известия НИИ Постоянного тока. Передача энергии постоянным и переменным током. Сборник № 11. "Энергия", Москва – Ленинград, 1965 г
3. Radu Munteanu, Israel Electric. «Using Leakage Current Monitoring Instruments for Pollution Monitoring on Overhead Lines»// World Congress & Exhibition on Insulators Arresters & Bushings. Honkong, 2005.