



Некоммерческое партнерство «Российский национальный комитет Международного Совета по большому электрическим системам высокого напряжения» (РНК СИГРЭ)

109074, Россия, г. Москва, Китайгородский проезд, дом 7, стр.3. ОГРН 1037704033817.
ИНН 7704266666 / КПП 770401001. Тел.: +7 (495) 627-85-70. E-mail: cigre@cigre.ru

ОТЧЕТ

о работе Исследовательского комитета СИГРЭ **D1 «Новые материалы и технологии»** по материалам 44-ой Сессии СИГРЭ 2012



Отчет подготовил:

[Ярмаркин Михаил Кириллович](#),

к.т.н., доцент, зав. кафедрой
«Электроэнергетическое оборудование
электрических станций, подстанций и
промышленных предприятий» ФГОУ ДПО
[«Петербургский энергетический институт
повышения квалификации»](#), наблюдательный
член от РНК СИГРЭ в [ИК D1 СИГРЭ](#), член
рабочих групп СИГРЭ [D1.44](#), [D1.45](#). Член-
корреспондент [АЭН РФ](#)

Контактные данные:

E-mail: yarmarkin_mk@mail.ru

Тел. +7 (812) 373-90-23, 373-90-24, 371-83-50.

Моб. +7 (921) 912-35-25.

Дата составления отчета:

02.12.2013

Москва, 2013 год

Настоящий отчет посвящен обзору докладов, представленных на [44-ой Сессии СИГРЭ](#), прошедшей с 26 по 31 августа 2012 года в Париже (Франция), по направлению исследовательского комитета D1 «Новые материалы и технологии» (Study Committee [D1 «Materials and Emerging Test Techniques»](#)).

Обзор структурирован по разделам, соответствующим предпочтительным темам направления D1 СИГРЭ:

1. Диэлектрики и старение изоляционных материалов.
2. Испытания на сверхвысоком напряжении, включая постоянное напряжение.
3. Средства диагностики.

В конце Отчета приводятся выводы и предложения по рассмотренным докладам.

Перечень представленных докладов

Всего представлено 11 докладов.

D1-101. Ю.В. Торшин (Россия)

Предсказание импульсного напряжения пробоя трансформаторного масла на основании анализа предразрядных явлений.

D1-102. A.Schaut, S.Eeckhoudt (Бельгия)

Влияние присадок триазола на свойства трансформаторного масла.

D1-103. Y.Bertrand, C.Tran-Duy, V.Murin, (Франция) A.Shaut, S.Autru, S.Eeckhoudt (Бельгия)

Распределительные трансформаторы низкого и среднего напряжения: исследование признаков старения бумаги.

D1-104. B.A.Arafa, A.Nosseir (Египет)

Влияние песчаных бурь на работу полимерных изоляторов.

D1-105. R.Frotsher, D.Dukovic, M.Jovalekic, S.Tenbohlen (Германия), J.Harthun, C.Perrier (Германия/Франция), M.Schafer (Германия).

Поведение синтетических жидких диэлектриков при электрических и тепловых воздействиях – от лабораторных измерений к практическому использованию.

D1-106. Y.Z.Lv, Y.F.Du, J.Q.Zhou, X.X.Li, M.T.Chen, C.R.Li, G.L.Wang (Китай).

Влияние наночастиц на электрическое старение минерального масла.

D1-107. J.Walker, F.Valot (Франция), Z.D.Wang, X.Yi.Q.Liu (Англия).

Новые альтернативные диэлектрические жидкости для трансформаторов на основе монобензолтолуола и дибензолтолуола.

D1-108. P.Wiklund, A.Biverstal, B.Pahlavanpour, J.Nunes (Бразилия).

Исследование образования низкомолекулярных кислот при старении целлюлозы в минеральном масле.

D1-109. Y.Onki, N.Hirai, T.Yamamoto, T.Minakava (Япония).

Опыт обследований и эксплуатации кабелей с полиэтиленовой изоляцией, используемых на атомных станциях в Японии.

D1-110. H.Nama, S.Okabe, M.Miyashita (Япония).

Старение изоляционных материалов в благоприятных условиях внутри компактного газоизолированного оборудования.

D1-111. J.C.Duart (Швейцария), L.C.Bates, E.W.Key (США), R.Asano JR (Бразилия), L.Cheim, D.B.Cherry, C.C.Claiborn (США).

Термическое старения целлюлозы в натуральных жидких диэлектриках в гибридных изоляционных системах.

Обзор представленных докладов

В докладе **D1-101** представлен первый этап создания нового метода инженерного расчёта маслonaполненных трансформаторов, который учитывает подробную физическую картину разрушения изоляции. Использован современный комплекс методов исследования разряда в широком диапазоне изменения экспериментальных условий, которые отражают особенности конструкции и эксплуатации главной изоляции силовых трансформаторов. Установлено, что пробой масла предшествует этап возникновения вспышки. Этот механизм сходен в разных сортах минерального масла. В ходе исследования определены критические параметры вспышечной стадии пробоя. Предложен новый метод прогнозирования пробивного напряжения для продуктов переработки нефти, используемых в промышленности. Расчётные данные хорошо согласуются с эмпирическими данными различных авторов.

В докладе **D1-102** указано, что последнее время в некоторых трансформаторных маслах была обнаружена недеklarированная примесь триазола. В ходе лабораторных исследований контролировались стойкости к разложению и окислению и выделение коррозионной серы. Стабильность соединения определяли путём нагрева в соответствии со стандартом IEC 61125. После нагрева масла в течение 24 ч, примеси триазола больше не обнаруживались. В присутствии меди катушек процесс ускоряется. С целью проверки влияния меди на устойчивость к окислению провели тест в соответствии с IEC 61125, сначала без предварительной обработки, а потом – после различной степени очистки ионнообменной смолой. Установлено, что в ходе очистки улучшена только устойчивость к окислению.

В докладе **D1-103** указана важность оценки остаточного ресурса распределительных трансформаторов низкого и среднего напряжения, когда установленный парк является довольно большим, как, например, во Франции. По этой причине EDF R & D совместно с LABORELEC провели исследование с целью поиска маркеров, позволяющих контролировать процесс старения крафт-бумаги, используемой для изоляции распределительных трансформаторов. Установлено, что молекула метанола MeOH – прекрасный маркер для идентификации ранней стадии деградации бумаги.

В докладе **D1-104** указано, что хорошие исходные электрические и физические свойства внешней изоляции могут существенно ухудшаться в условиях пустыни при воздействии сильных песчаных бурь. Частицы песка накапливаются на поверхности изоляторов либо в ходе длительного времени, когда песок постепенно оседает на изоляторе, либо быстро – при песчаных бурях. В пустынных районах почти ежегодно возникают песчаные бури, и песок осаждается на поверхности изолятора в течение нескольких часов. В

докладе представлены экспериментальные результаты, полученные из обширного исследовательского проекта. В целях изучения долгосрочного влияния песчаных бурь на физические и электрические характеристики изоляторов из силиконовой резины, полимерные изоляторы были подвержены воздействию искусственных песчаных бурь с размером зерен песка менее 150 мкм и скоростью воздушного потока 5 м/с в течение длительного времени в диапазоне от 30 до 150 часов. Сравнительные исследования проведены на полимерных длинностержневых изоляторах, а также на гирляндах фарфоровых тарельчатых изоляторов аналогичной длины.

В докладе **D1-105** указано, что синтетические жидкости могут быть альтернативой обычному минеральному маслу в случаях, когда не требуются высокой экологичности и пожарной безопасности. Обобщены результаты многочисленных лабораторных исследований природных и синтетических жидкостей при различных конфигурациях электродов и их старение. Особое внимание обращается на устойчивость к окислению природных эфиров. Опыт эксплуатации, накопленный в различных установках, показывает, что синтетические жидкости могут быть успешно использованы в трансформаторах всех размеров. Ввиду различных функциональных требований могут быть использованы электродные системы, создающие однородные или весьма неоднородные электрические поля. Для неоднородных конфигураций, синтетические жидкости показывают более низкую диэлектрическую прочность, чем минеральные масла, что приводит к снижению выдерживаемого напряжения. Это обусловлено различиями в механизме распространения разряда в сравнении с минеральным маслом. Природные диэлектрики нуждаются в герметичных уплотнениях, поскольку наличие кислорода влияет на диэлектрические параметры и увеличивает вязкость до неприемлемого уровня. Чтобы сохранить жидкость в определённом состоянии, попадание кислорода и влаги должно быть ограничено.

Увеличение вязкости требует определенной корректировки системы охлаждения обмоток трансформатора и пропитки бумажной изоляции. По той же причине возникают ограничения на применяются масла при температуре не ниже -10°C . Описан первый опыт работы с трансформатором 40 МВ·А 110/20 кВ, заполненным новым диэлектриком.

В докладе **D1-106** предложен новый тип трансформаторной изоляции на основе минеральных масел с примесью полупроводниковых наночастиц для улучшения стойкости к старению и влагостойкости.

В ходе работы было выполнено ускоренное старение изоляции при температуре 130°C в течение 6 дней. Исследовалось напряжение пробоя при переменном и импульсном напряжении, а также напряжение возникновения ЧР как в чистом минерального масле, так и в наножидкости с различной влажностью.

Установлено, что электрическая прочность при переменном и импульсном напряжении наножидкости оптимального состава выше, чем в чистом масле. Длительность развития пробоя в наножидкости более чем на 60% больше по сравнению с чистым маслом, поскольку заметно снижается скорость распространения стримера между электродами. Следует отметить, что влагостойкость наножидкости значительно улучшается при высоком влагосодержании. Результаты испытаний показали, что полупроводниковые наночастицы могут не только повысить стойкость минерального масла к старению, но и улучшить его влагостойкость.

В докладе **D1-107** рассмотрены свойства вещества моно/добензолтолуол (М/ДБТ) на основе синтетических ароматических углеводородов. Это изоляционная жидкость определена стандартом МЭК 60867 как производное метилполиакрилметана. В высоковольтных конденсаторах М/ДБТ используется более 25 лет. Также он был одобрен для применения в емкостных трансформаторах напряжения и вводах.

Описаны экспериментальные исследования по измерению электрической прочности при переменном напряжении, проведённые на нефтепродуктах, природных эфирах и М/ДБТ. В ходе работы определялось 1%-ное выдерживаемое напряжение.

Кроме того, исследовались характеристики диэлектрических жидкостей с определенной долей М/ДБТ. Результаты подтверждают, что при добавлении 3-10% М/ДБТ прекращается газовыделение, а также могут быть подавлены ЧР как в масле, так и природном эфире. При этом напряжения пробоя и 1%-ное выдерживаемое напряжения исследуемых жидкостей и их смесей практически не меняются.

В докладе **D1-108** отмечено, что целлюлоза в виде бумаги и картона в сочетании с минеральным маслом по-прежнему доминирует в системе изоляции в большинстве конструкций трансформаторов. Тем не менее, в научной литературе всё ещё существует недостаток информации относительно процесса химического старения целлюлозы и того, какие последствия этот процесс имеет для минерального масла. В настоящей работе исследовалось совместное старение целлюлозы и масла.

Сопоставлены результаты старения целлюлозы в условиях повышенной температуры при наличии бумаги и без неё.

Результаты испытаний показали, что на начальной стадии старения бумага может поглотить определённое количество низкомолекулярных (летучих) кислот, которые образуются при окислении масла. Возможно именно поэтому проходит несколько лет до начала какого-либо изменения кислотности масла в новых трансформаторах. Обнаружено, что в присутствии бумаги старение масла существенно замедляется.

В докладе **D1-109** описаны исследования, выполненные с целью разработки надёжного метода мониторинга и оценки степени деградации полимерной изоляции кабелей, позволяющего определить местоположение

дефекта в кабеле путём измерения амплитуды и фазового угла в диапазоне частот от 1 до 110 МГц. Для анализа спектров использовали быстрое преобразование Фурье (IFFT).

Испытания проводили на отрезке кабеля длиной 25 м с изоляцией из огнестойкого этилен-пропиленового каучука (FR-EPR), часть которого была обработана γ -лучами в течение 4000 часов с интенсивностью 1 кГр / ч при температуре 100 ° С (с общей дозой облучения 4 МГр). Результаты показали, что для применения предложенного метода на атомных электростанциях его чувствительность необходимо существенно увеличить.

В докладе **D1-110** оценивается старение изоляционных материалов, используемых для изготовления твёрдой изоляции и диэлектрических покрытий и герметизированном оборудовании с элегазовой изоляцией, в том числе функционально-градиентных материалов (ФГМ).

Обсуждаются три направления исследований. Во-первых, исследовано влияние размера микроскопического дефекта внутри твёрдого изолятора. Установлено, что наиболее опасный тип дефекта – трещина. Во-вторых, были исследованы характеристики толстых и тонких диэлектрических покрытий на электродах высокого напряжения, позволяющие в 1,5 раза увеличить напряжённость электрического поля по сравнению с электродом без покрытия. В-третьих, исследована возможность расширения срока службы оборудования путём применения изоляторов на основе FGM. Предполагается, что изолятор из FGM будет иметь срок службы в 2 - 8 раз больше, чем обычный. Сделан вывод, что совершенствование метода оценки старения твёрдых изоляционных материалов и диэлектрических покрытий – одно из основных условий для реализации компактного элегазового оборудования.

В докладе **D1-111** описано о необходимости применения новых и традиционных материалов при изготовлении трансформаторов. Предложено использовать преимущества высокотемпературных материалов, таких как NOMEX® в самых нагретых частях, что позволяет снизить скорость теплового старения, в то время как остальные элементы изоляция выполнены из традиционных материалов на основе целлюлозы. При этом, допустимая температура масла остаётся сдерживающим фактором (**чего?**) в конструкции трансформатора.

Новые горизонты развития в последнее время открылись в связи с использованием природных эфиров с высоким содержанием олеиновой кислоты, таких как BIOTEMP®. В связи с высокой стабильностью этой жидкости использование гибридных систем возможно при более высокой температуре.

Приведены результаты исследования процесса старения толстых доскоподобных структур из целлюлозы в естественном жидком эфире и в минеральном масле при повышенной температуре. Результаты показывают, что старение целлюлозной платы, а также крафт-бумаги в естественном жидком эфире происходит медленнее, чем в минеральном масле.

Перечень представленных докладов

Всего представлено 5 докладов.

D1-201. А. Лоханин, А.Корякин, О.Волкова (Россия).

Выбор формы испытательного импульса коммутационных перенапряжений и влияние атмосферных условий на наружную изоляцию сверхвысокого напряжения.

D1-202. М. Marzinotto, G. Mazzanti (Италия)

Оценка электрического поля в толще изоляции экструдированных кабелей высокого напряжения постоянного тока на основе измерения объёмного заряда.

D1-203. М.Hinow, R.Pietsch, T.Steiner, H.Scharz (Германия)

Исследование грозовых импульсов в условиях высокой определённости.

D1-204. S.Okabe, T.Tsuboi, G.Ueta, Y.Yamagata, E.Zaima (Япония)

Исследование влияния формы грозовых импульсов при испытаниях оборудования ультравысокого напряжения.

D1-205. Y.Li (Австралия)

Линейность коэффициента деления и её связь с параметрами формы импульса в импульсных делителях ультравысокого напряжения.

Обзор представленных докладов

В докладе **D1-201** приведены экспериментальные данные об электрической прочности изоляционных конструкций оборудования сверхвысокого напряжения (выше 800 кВ). Длина фронта испытательного импульса коммутационных перенапряжений менялась в пределах от десятков мкс до 5500 мкс.

Показано, что внешняя изоляция оборудования класса напряжения 1000 кВ – 1200 кВ обладает минимальной электрической прочностью при длительности фронта апериодического импульса в интервале 400 мкс – 800 мкс. Для испытания внешней изоляции электрооборудования сверхвысокого напряжения (1000 кВ-1200 кВ) предлагается принять в качестве стандартного коммутационного импульса апериодический импульс с длительностью фронта 500 мкс и/или однополярный колебательный импульс с длительностью фронта 1000 мкс.

Также представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию атмосферных условий на электрическую прочность внешней

изоляции при воздействии однополярного колебательного коммутационного импульса положительной полярности.

Обнаружено существенное снижение разрядного напряжения внешней изоляции в процессе снижения температуры воздуха до отрицательной ($T < 0^\circ \text{C}$). Установлено, что рекомендованные МЭК 60060-1 поправочные коэффициенты на атмосферные условия, действительные для области положительных температурах воздуха, не могут быть распространены в область отрицательных температур воздуха. Предложены поправочные коэффициенты для области температуры атмосферного воздуха вблизи нуля градусов.

В докладе **D1-202** предлагается процедура для измерения объёмных зарядов в полномасштабных образцах экструдированных кабелей HVDC. Цель работы – оценить электрическое поле в изоляции кабеля в различных условиях. Такая процедура может быть использована в предварительных квалификационных испытаниях для получения характеристик кабелей, а результаты могут быть полезны для того, чтобы не проводить испытания новых кабелей, изготовленных с такой же изоляцией и полупроводниковыми элементами, но разной геометрией поперечного сечения. Следует отметить, что общего мнения о пределах пространственного заряда не существует. Однако изменения электрического поля в изоляции по отношению к полю Лапласа свидетельствует о состоянии изоляции.

В докладе **D-203** рассмотрено известное явление наложения колебательного процесса на испытательный грозовой импульс, связанное с действием паразитных индуктивностей в испытательной установке. Это явление известно как выброс напряжения.

На установке с хорошо определёнными индуктивностями выполнены измерения электрической прочности промежутка стержень-плоскость и сфера-плоскость в воздухе при воздействии грозового импульса, причём величина выброса по амплитуде β менялась в пределах от 5 до 20 %, а частота в пределах от 230 до 800 кГц.

При отрицательной полярности пробой происходил на амплитуде импульса. Влияние выброса ограничено временем 0,5 нс после амплитуды. В этих условиях выбросы не оказывают влияния на пробой промежутка, который определяется только амплитудой грозового импульса.

Иная ситуация может наблюдаться при импульсах положительной полярности. Пробой происходит на «хвосте» импульса, до 2 нс после амплитуды. В этом случае выбросы оказывают большее влияние на пробой изоляционного материала. Поэтому для каждого материала следует определить индивидуальный коэффициент k для положительной и отрицательной полярностей импульса.

В докладе **D1-204** имеются два раздела. В первом из них изучена реально получаемая форма грозового импульса и его соответствие действующим стандартам. Во втором разделе рассмотрена методика оценки

коэффициента k , позволяющего сопоставить реальную и нормированную формы грозового импульса.

Основные положения доклада:

1. Ёмкость испытываемого оборудования сверхвысокого напряжения составляет 5 – 15 пФ и более. В соответствии с фактическими результатами и расчётами, для получения формы импульса с выбросом β менее 10% необходимая длина фронта импульса достигает 2.2 мкс и даже превосходит 3.0 мкс.

2. Эксперименты на моделях большого размера показывают, что уменьшение длины фронта импульса менее 3.6 мкс оказывает лишь незначительное влияние на получаемые характеристики изоляции. С другой стороны, электрическую прочность можно проверить на большей длине фронта.

3. Предлагаемый метод, основанный на анализе основной кривой, позволяет оценить коэффициент β более точно.

4. В соответствии с экспериментальными результатами, метод оценки коэффициента k достаточно эффективен и для класса сверхвысокого напряжения.

5. Для оценки коэффициента k желательно иметь возможно малую величину β , не превосходящую 10%.

6. Поскольку с увеличением размеров оборудования коэффициент k имеет тенденцию уменьшаться, возможно, что в будущем существующая величина должна быть скорректирована для класса сверхвысокого напряжения.

В докладе **D1-205** представлены результаты испытаний и исследования линейности характеристик делителя напряжения на напряжение до 2400 кВ. Обсуждаются методы расчёта линейности параметров. Сделан вывод, что уменьшение нелинейности коэффициента деления менее 3% и нелинейности временных параметров менее 5% в диапазоне сверхвысоких напряжений затруднительно. Для получения более точных результатов необходимы другие методы измерений.

Перечень представленных докладов

Всего представлено 14 докладов.

D1-301. A.Anandkuraman, H.G.Sedding (Канада)

Контроль старения кабелей на атомных электростанциях.

D1-302. G.Csepes, B.Nemeth, C.Voros (Венгрия)

Экспертная система для интерпретации результатов диагностики силовых трансформаторов.

D1-303 СНЯТ.

Статистическая оценка содержания растворённых газов: сопоставление стандартной методики и метода фотоакустической спектроскопии.

D1-304. S.M.Ноек (Австрия), S.M.Neuhold (Швейцария)

Измерение частичных разрядов в газоизолированных системах на сверхвысокой частоте со средней полосой пропускания.

D1-305. J.Needly (Чехия), H.Halbwirth (Австрия)

Защита силовых трансформаторов 400 кВ и 220 кВ от растворённых газов.

D1-306. F.Petzold, D.Getz, H.Achlapp, H.T.Putter (Германия), H.Oetjen, N.Hampton, J.Perkel (США)

Оценка состояния изоляции силового электрооборудования высокой ёмкости с использованием метода Хамона.

D1-307. S.S.Zheng, C.R.Li, Z.G.Tang, W.Z.Chang, B.Zhou (Китай)

Контроль частичных разрядов в трансформаторах в сверхширокополосном радиодиапазоне.

D1-308. A.Girodet, S.Fifi, D.Gautschi, G.Luna, R.Lebreton (Франция).

Обнаружение дефектов при сверхвысокочастотных измерениях в пофазно экранированных и трёхфазных газоизолированных системах, а также в силовых трансформаторах.

D1-309. F.Garnacho, M.A.Sanchez-Uran, J.Ortego, F.Alvares, O.Perpinan, E.Puelles, R.Moreno, D.Prieto, D.Ramos (Испания).

Новая методика определения условий работы оборудования высокого напряжения, основанная на измерении частичных разрядов в процессе эксплуатации

D1-310. I.J.Seo, J.Y.Koo, Y.J.Lee, B.W.Lee, J.T.Kim, J.H.Lee (Корея).

Идентификация дефектов изоляции на основе статистического анализа частичных разрядов при постоянном напряжении.

D1-311. R.Montes-Fernandez. V.R.Garcia-Colon, A.Guzman Lopez (Мексика)

Спектроскопический контроль дефектов в трансформаторных обмотках, возникающих под действием продуктов разложения масла.

D1-312. J.H.Rodriguez-Rodriguez, F.Martinez-Pinon, J.A.Alvarez-Chavez (Мексика)

Измерение влагосодержания бумажно-масляной изоляции в ближнем инфракрасном диапазоне.

D1-313. M.Bagheri, M.Salay Naderi, T.R.Blackburn, T.Yu (Австралия)

Применение метода FRA для определения механических повреждений в трансформаторе 400 МВА.

D1-314. C.Zhou, X.Jing, Z.Tang, W.Jiang, B.Alkali, W.Zhou, J.Yu (Китай)

Статистический анализ данных о повреждениях силовых кабелей.

Обзор представленных докладов

В докладе **D1-301** отмечено, что кабельные системы имеют решающее значение для безопасной, надёжной и экономичной эксплуатации атомных электростанций. Описан подход к управлению старением кабелей низкого и среднего напряжения, основанный на измерении электрических свойств материала в лаборатории и в полевых условиях. Обсуждается эффективность различных химических, механических и электрических методов испытания с учётом следующих условий:

- конфигурация кабельной системы, т. е. уровень напряжения (низкого или среднего), экранированный или неэкранированный кабель и т.п.
- тип материала изоляции, то есть (поливинилхлорид, полиэтилен, этилен-пропилен),
- интенсивность облучения, электрических, тепловых, радиационных и других воздействий, приводящих к старению кабеля.

Электрические методы испытаний, например, определение выдерживаемого переменного напряжения, измерение уровня ЧР и различные методы измерения диэлектрических потерь были признаны эффективными для кабелей среднего напряжения. Однако, они имеют ограниченное применение для кабелей низкого напряжения в связи с отсутствием определённых точек заземления. Вместо этого, более эффективна оценка состояния кабелей низкого напряжения на основе химического анализа материалов изоляции и оболочки кабелей.

В докладе **D1-302** рассмотрен спектр методов, используемых для контроля изоляции силовых трансформаторов. Многие классические методы (измерение сопротивления изоляции, коэффициента поглощения, изменение тангенса угла потерь, измерения содержания воды и т.д.) используются в течение многих десятилетий.

Диагностика таких сложных систем, как неоднородные изоляции с учётом температуры, увлажнения и процессов старения чрезвычайно трудна. В ходе работ были исследованы следующие методы анализа: измерения

восстанавливающегося напряжения (RVM), частотный анализ диэлектрических потерь, и измерения поляризационных и депольризационных токов (PDC).

На основании результатов лабораторных экспериментов и полевых измерений разработана экспертная система, позволяющая судить о фактическом состоянии силовых трансформаторов различного возраста.

В докладе **D1-304** обсуждаются особенности состава и характеристик систем измерения ЧР в оборудовании сверхвысокого напряжения.

В докладе **D1-305** описывается метод диагностики масляных силовых трансформаторов, который можно эффективно использовать при обслуживании трансформаторов 400 и 220 кВ. Приводится пример, детально иллюстрирующий данный способ.

В докладе **D1-306** для обработки спектров диэлектрических потерь в оборудовании с бумажно-масляной изоляцией (трансформаторов, вводов, силовых кабелей) предложено использовать преобразование Намон. Длительность измерений снижается в несколько раз по сравнению с классическими измерениями. Намон-преобразование удобно для применения в полевых условиях.

В докладе **D1-307** указано, что обнаружение источников ЧР в силовых трансформаторах имеет большое значение для оценки состояния изоляции и диагностики. Акустические и электрические методы в настоящее время часто малоэффективны из-за низкой чувствительности и плохой маневренности. Предложен новый метод определения местоположения источника ЧР на основе временных различий радиочастотных волн в сверхшироком диапазоне изменения частоты. Влияние железа сердечника и медных обмоток на распространение радиоволн моделируется с помощью метода конечных разностей во временной области. Изучен спектр типичных ЧР. Результаты свидетельствуют, что все ЧР происходят в масле на частотах до 4 ГГц. Найдено оптимальное положение датчиков ЧР, позволяющее избежать ошибок, вызванных дифракцией волн на сердечнике. Выполнены полевые испытания на трансформаторе класса 220 кВ. Чувствительность предложенного метода для измерения ЧР в обмотках ниже 500 пКл, погрешность измерения времени не более чем 0,5 нс, погрешность определения места расположения дефекта не более 0,3 м.

В докладе **D1-308** описано применение техники измерений на сверхвысокой частоте (СВЧ) для контроля состояния газоизолированных систем (ГИС) и силовых трансформаторов.

Выполнены измерения затухания на различных компонентах ГИС и в полностью собранном состоянии. Показано, что передача сигналов СВЧ зависит от положения переключающего устройства (замкнут или разомкнут) и от положения устройства внутри подстанции.

Силовой трансформатор имеет иную структуру по сравнению с ГИС. Бак трансформатора, магнитный сердечник и обмотки способны изменить

распространение СВЧ. В то время как в ГИС, как правило, достаточно иметь два датчика, чтобы найти источник ЧР, то для силовых трансформаторов необходимы четыре СВЧ датчика, расположенных в исследуемой области. Для силовых трансформаторов с несколькими корпусами установка датчиков СВЧ в сочетании с акустическими в каждом элементе позволяет локализовать даже несколько источников ЧР.

В докладе **D1-309** описывается новая система измерения уровня ЧР, разработанная в электрическом отделе инженерии Политехнического университета Мадрида и эксплуатируемая в течение последних двух лет в Gas Natural Fenosa (Мадрид). Существенная особенность данной системы – наличие большого количества датчиков ЧР, размещённых в сети высокого напряжения, выделение сигналов ЧР на фоне помех, определение чувствительности измерений ЧР, идентификация и локализация существующих источников ЧР и корреляция между каждым источником ЧР и связанных с ним дефектов.

В докладе **D1-310** отмечена актуальность разработки системы контроля высоковольтного оборудования постоянного напряжения.

В 2001 г. авторы предложили метод хаотического анализа ЧР (ХАЧР) для систем переменного тока, основанный на анализе двух последовательных импульсов и включающий контроль соотношения амплитуд импульсов, интервала времени между ними и величины приложенного напряжения.

В докладе описан модифицированный метод ХАЧР для анализа ЧР, возникающих в аппаратах постоянного тока во время эксплуатации. На первой стадии исследования были выполнены на искусственно введённых дефектах. Сигналы ЧР улавливались и обрабатывались в соответствии с новым методом.

В докладе **D1-311** методом диэлектрической спектроскопии предложено контролировать процесс образования Cu_2S на медных проводниках в маслах с высоким содержанием серы. На модели трансформаторной обмотки показано, что это легко выполняется на частотах ниже 1 кГц. На указанных частотах результаты измерений сильно зависят от температуры и влажности масла. Для уменьшения влияния влажности в расчётах использовали значение проводимости, полученное в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц.

В докладе **D1-312** указано, что измерение и мониторинг влажности имеет важное значение для прогнозирования срока службы и условий работы силовых трансформаторов. Бумажно-масляная изоляция в силовых трансформаторах ухудшается и постепенно стареет под воздействием влаги, а также электрических, химических и механических факторов. Хорошо известно, что влага – основной источник повреждения изоляции в высоковольтных трансформаторах напряжения. В докладе описаны прямые оптические измерения содержания воды в бумажной изоляции, погруженной в трансформаторное масло. Образцы располагали внутри испытательной камеры, в которой находился источник воды и бумажный капиллярный

мост, по которому вода поступала на исследуемый образец. Оптические измерения содержания воды проводили в ближней инфракрасной области от 900 до 1500 нм. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований пропускания света через трансформаторное масло и воду. Предложены критерии для установления наилучшего оптического диапазона для достижения максимальной чувствительности.

Предлагаемая методика может быть использована для мониторинга электрических аппаратов, в которых бумажно-масляная изоляция находится под воздействием сильного электрического поля. Это прямой и быстрый метод контроля влагосодержания бумаги, погружённой в масло; может быть реализован с помощью дешевого и компактного оборудования.

В докладе **D1-313** на примере повышающего трансформатора мощностью 400 МВА уточняется возможность применения частотного метода FRA для оффлайн обнаружения механических неисправностей.

Описана методика определения механических дефектов обмоток и выполнено её сопоставление с существующими методиками для сравнения их эффективности. Механические повреждения могут возникнуть из-за различных нарушений, таких как токи короткого замыкания, тяжёлые взрывы горючих газов, землетрясения, или непригодные методы транспортировки и несчастные случаи.

Выполнены измерения потерь и тока холостого хода, сопротивления изоляции, коэффициента диэлектрических потерь, сопротивления постоянному току, анализа содержания воды. FRA-испытания были проведены, чтобы определить, в состоянии ли метод дать более подробную информацию о неисправностях. Измерение передаточной функции частотной характеристики обмоток трансформатора были проведены на высоковольтной обмотке в отдельности. Результаты испытаний на этих больших обмотках трансформатора показывают, что метод FRA способен обеспечить дополнительной информацией по сравнению с другими, традиционными методами относительно физического перемещение обмоток трансформатора сердечника.

В докладе **D1-314** анализируются данные по авариям кабелей и определяются ведущие к аварии или деградации стрессовые факторы. Применены и сопоставлены две статистические модели: Вейбулла и Grow-AMSAА. Использовали данные, полученные в высоковольтной кабельной сети в г. Ухань, Китай.

В работе показано, что распределение Вейбулла, который моделирует возраст кабеля до отказа, обеспечивает более точное соответствие в случае малой выборки. Использование модели пропорциональных рисков позволяет выполнить количественную оценку факторов, ведущих к авариям или ускоренной деградации изоляции. Результаты, получаемые с помощью этой модели, обеспечивают адекватную информацию, позволяющую принять оптимальное решение в процессе эксплуатации или замены кабелей.

Выводы и предложения

1. На сессии 2012 года не было представлено каких-либо принципиально новых материалов или технологий. Традиционные материалы (целлюлоза, трансформаторное масло и т.п) продолжают быть основным предметом исследований.

2. Судя по полученной информации (доклад **D1-106**), нанотехнологии не оправдали ожиданий электриков и не дают сколько-нибудь существенных и бесспорных преимуществ.

3. В представленных докладах отсутствуют новые разработки средств измерения с использованием опто-волоконных или опто-кристаллических технологий. В связи с этим крайне важным представляется вывод доклада **D1-205** о невозможности обеспечить высокую точность измерения напряжения с помощью обычных делителей напряжения. Это прямое указание на необходимость разработки средств измерения токов и напряжений, построенных на совершенно иных физических эффектах, в частности – оптические измерители на эффекте Поккельса.