

# ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДА ИСПЫТАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ СВЕРХНИЗКОЙ ЧАСТОТЫ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДВА ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Х.Т. Путтер (H.T. Putter), Д. Гётц (D. Götz), Ф. Петцольд (F. Petzold) компания «SebaKMT» и Х. Оетджен (H. Oetjen) компания «HDW Electronics», М.Захаров ООО «Себа Спектрум»

В связи с нормативными актами, регулирующими рынок электроснабжения, вопросы обеспечения надежности работы распределительных электрических сетей становятся все более важными. Операторы сетей должны обеспечивать тщательное обслуживание кабельных сетей. Испытания на прочность, проводимые сразу после установки или после ремонтных работ по устранению отказов, позволяют существенно снизить уровень отказов в процессе нормальной эксплуатации сетей.

В настоящей статье рассматриваются вопросы эволюции метода испытания напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ) за последние два десятилетия. С момента внедрения в практику метода СНЧ изменилась не только технология метода. Применение на практике данной методики получает все большее внимание со стороны компаний, управляющих снабжающими электросетями, т.к. широкое применение получили разнообразные системы, реализующие данный метод, а также собрано большое количество данных по их практическому применению; по данной тематике проведены серьезные исследовательские работы.

## I. Почему следует использовать испытания СНЧ

Метод испытания напряжением СНЧ был введен в практику в 1986 г.; основной причиной его разработки явилась необходимость разработки новых методов испытаний для кабелей с полимерной изоляцией и огромным количеством проблем, связанных с эффектами водных триингов (*водный триинг или дендрит - образование разветвленной микроструктуры в виде объемной сетки или микрокустов в теле диэлектрика*) в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена первого поколения. Целый ряд исследователей продемонстрировали, что традиционно использовавшийся метод испытания постоянным напряжением применительно к кабелям с полимерной изоляцией приводит к образованию в полимерном материале объемных зарядов. Подобные объемные заряды могут сохраняться внутри аморфных областей полимерного материала вплоть до 24 часов. Если на кабель будет возобновлена подача энергии до того, как все объемные заряды исчезнут, то возникнет локальное перенапряжение, которое может привести к электрическому триингу и в результате, вскоре после ввода кабеля в эксплуатацию произойдет его пробой.

Именно по этой причине в большинстве стран метод испытания постоянным напряжением запрещен к применению при испытаниях кабелей с полиэтиленовой /сшитой полиэтиленовой изоляцией, а также из-за ряда других недостатков, присущих данному методу, а именно:

- метод нечувствителен к целому ряду дефектов, например, к чистым полостям или надразам;
- метод не позволяет воспроизвести существующее распределение нагрузки при переменном сетевом напряжении. Распределение нагрузки чувствительно к температуре и температурному распределению.

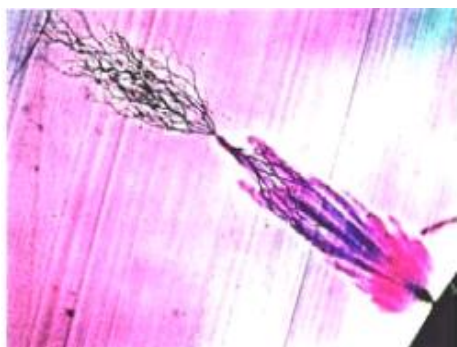


Рис. 1. Водный триинг критической длины может эффективно выявляться с помощью метода испытания СНЧ по материалам Н.Т. Putter, 2007, "Investigation of Water Treeing - Electrical Treeing Transition in Polymeric Insulation of Service Aged Power Cables" TU-Delft, Thesis.

Кроме того, метод СНЧ имеет ряд дополнительных преимуществ по сравнению с методом испытания переменным напряжением с частотой 50 Гц или резонансной:

- меньший вес испытательного оборудования;
- большая допустимая емкость испытываемого кабеля;
- создает меньше повреждений исправной изоляции.

На рис. 2 показан график зависимости напряжения пробоя от частоты испытательного напряжения для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при наличии и отсутствии механических повреждений. Из графика четко видно, что величина напряжения пробоя для кабеля без механических повреждений имеет максимальное значение на частоте 0,1 Гц, т.е. проведение испытания методом СНЧ на кабеле с целостной изоляцией не приводит к повреждениям / старению изоляции, в то время как испытания на рабочей частоте или более высокой имеют существенно меньшее напряжение пробоя. Это означает, что напряжение с частотой 50 Гц существенно сильнее воздействует на изоляцию, чем напряжение СНЧ на частоте 0,1 Гц.

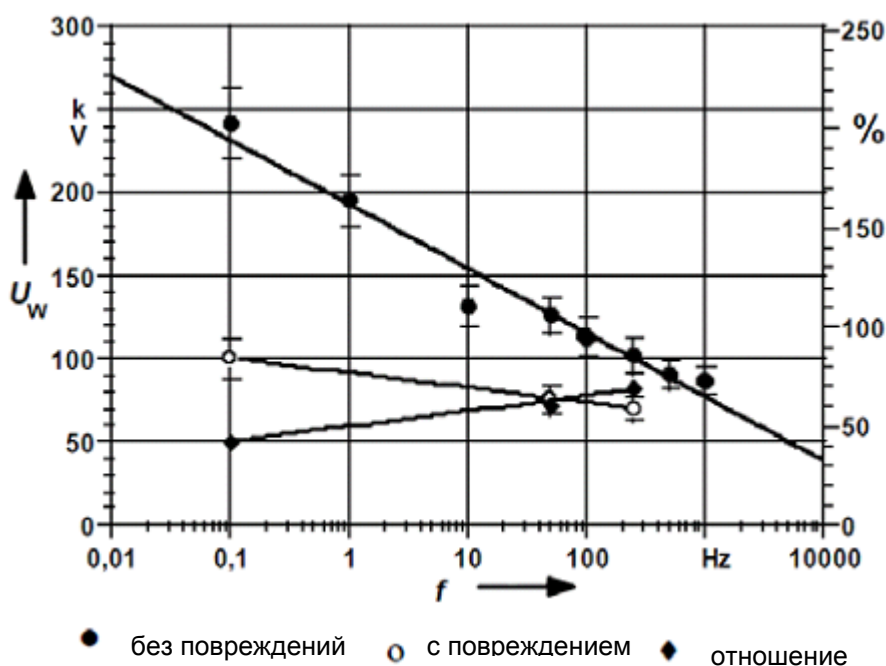


Рис. 2. Напряжение пробоя как функция частоты для модели кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена без и с механическими дефектами по материалам E.

Gockenbach, "The selection of the frequency range for high-voltage on-site testing of extruded cable systems" IEE Electrical Insulation Magazine Vol. 16 No. 6, pp. 11-16

С другой стороны эффективность поиска повреждений или водных триингов выше всего на частоте 0,1 Гц, см. рис. 3. Третий и четвертый столбцы соответствуют механическому повреждению внутри кабеля и водному триингу. Как следует из рис. 3, напряжение пробоя для этих дефектов имеет наименьшую величину на частоте 0,1 Гц и, таким образом, метод СНЧ лучше всего подходит для идентификации дефектов в изоляции кабеля.

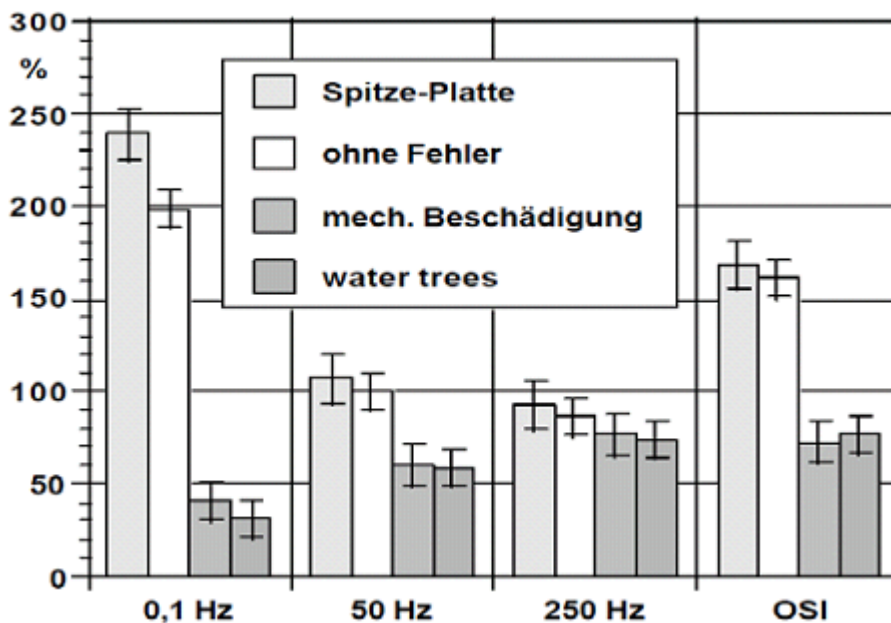


Рис. 3. Относительное напряжение пробоя на объектах формы от прутка до пластины и для кабеля с и без дефектов изоляции для нескольких напряжений различной формы по материалам E. Gockenbach, 2002, "Grundsatzliche Untersuchungen zum Durchschlagverhalten kunststoffisoliert Kabel bei Spannungen unterschiedlicher Frequenz" BEWAG Symposium Berlin, Germany

## II. Существующие методики испытания СНЧ

Первые испытательные установки СНЧ работали на до сих пор существующей и хорошо зарекомендовавшей себя косинусно - прямоугольной форме напряжения. В начале 90-х годов была внедрена синусоидальная форма напряжения СНЧ. Эти две формы испытательного напряжения по-прежнему широко применяются при пусконаладочных испытаниях вновь проложенных кабелей, а также при контроле «состарившихся» кабелей, проходящих техническое обслуживание. Это делается для того, чтобы выявить слабые места, имеющие критическое значение, например, намокшие соединения или водные триинги критической длины.

Данные технологии отличаются только формой используемого напряжения, см. рис. 4. Кроме применения косинусно - прямоугольной и синусоидальной форм также имеются системы, в которых форма испытательного напряжения похожа на синусоидальную.

Первые две модификации наиболее часто используются при проведении испытаний, при этом каждая из них обладает своими преимуществами и недостатками.

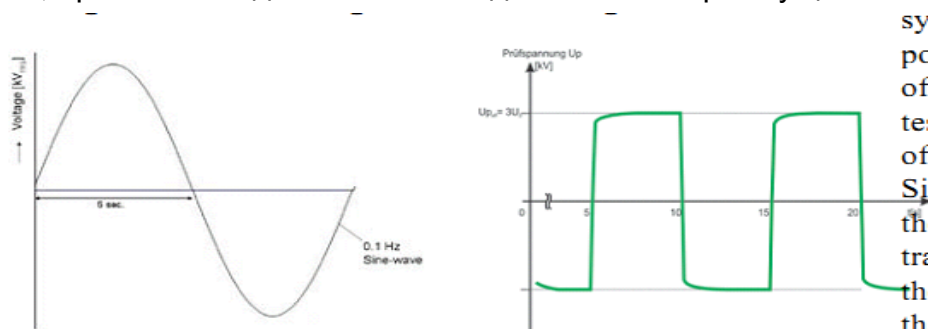


Рис. 4. а) Напряжение синусоидальной формы  
 б) Напряжение косинусно - прямоугольной формы (изменение полярности приводит к созданию косинусообразной волны с частотой близкой к 50Гц).

## **А. МЕТОД ИСПЫТАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ СЧ КОСИНУСНО-ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ**

Именно эта методика, основанная на применении косинусно-прямоугольной формы напряжения, появилась первой. Установка, реализующая эту методику, включала в себя источник постоянного напряжения, катушку индуктивности, управляемую от роторного переключателя и вспомогательной емкости. В связи с развитием электроники в настоящее время роторный переключатель заменен на тиристорный, что позволило снизить весо-габаритные параметры и создать более мощную установку.

Одно из существенных преимуществ использования косинусно-прямоугольной формы – возможность рециркуляции мощности в процессе изменения полярности, основанной на резонансном принципе. Именно поэтому удалось добиться достаточно низкого потребления мощности при высокой емкостной нагрузке. В настоящее время имеются установки с максимальной емкостной нагрузкой 25 мкФ при напряжении 60 кВ (СКЗ).

Изменение полярности напряжения в такой установке осуществляется в виде кривой косинусообразной формы с частотой близкой к 50 Гц, см. рис. 5. И таким образом распределение поля напряжения сравнимо с тем, что наблюдается на рабочих частотах кабеля.

Ограничением применения косинусно-прямоугольной формы СЧ является тот факт, что при использовании данной методики приходится предпринимать большие усилия для обеспечения возможности диагностики частичных разрядов (ЧР) или измерения тангенса дельта. Последнее может быть выполнено с помощью аппроксимации Хамона - В.В. Hamon, "An approximate method for deducing dielectric loss factor from direct-current measurements", Proc. IEEE, vol.99, 151-155].

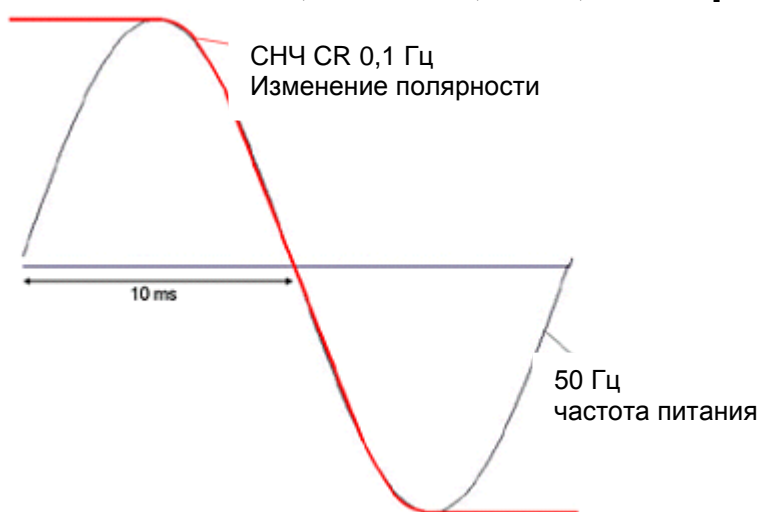


Рис. 5. Изменение полярности косинусно-прямоугольного напряжения.

Поскольку напряжение имеет прямоугольную форму, появляется возможность измерения тока утечки во время проведения испытаний. Величина тока утечки является индикатором качества изоляции кабеля.

## **Б. МЕТОД ИСПЫТАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ СЧ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ**

В начале 90-х годов была предложена методика испытания напряжением СЧ синусоидальной формы. Данные установки уже использовали последние достижения в развитии электроники, имевшиеся к тому моменту. Развитие базы комплектующих позволило создать систему с большей производительностью, меньшим весом и

габаритами. Принцип работы установки основан на применении преобразователя переменный ток – постоянный ток – переменный ток. Синусоидальные установки СНЧ не могут повторно использовать мощность, накопленную в кабеле, т.к. накопленная в кабеле энергия должна быть разряжена и преобразована в тепло на разрядном сопротивлении. Именно поэтому в общем случае емкостная нагрузка в синусоидальной установке ниже, чем в косинусно-прямоугольной.

Преимуществом использования чисто синусоидальной формы напряжения заключается в возможности комбинации такой системы с диагностическими средствами, которые позволяют, например, провести диагностику частичных разрядов (ЧР) или измерение тангенса дельта. Тем не менее, поскольку испытательная частота в 500 - 600 раз отличается от рабочей частоты кабеля, характеристики ЧР не являются теми же самыми. При таком подходе уже не удастся получить прямой корреляции между приложенным испытательным напряжением и важными параметрами ЧР, соответствующими рабочей частоте сети в 50 / 60 Гц. Более того, недавно проведенные исследования N. Jäverberg, H. Edin, "Applied Voltage Frequency Dependence of Partial Discharges in Electrical Trees" Proc. IR-EE-ETK, Stockholm, Sweden, 2009 показали, что ЧР вообще затухают на более низких частотах.

### III. Влияние частоты испытательного напряжения

На рис. 6 представлены графики развития электрического триинга для нескольких видов формы испытательного напряжения и частот в зависимости от амплитуды испытательного напряжения по материалам E. Neudert, M. Sturm, "Characterization of tree processes in XLPE by PD Measurement at 50 Hz and very low frequencies", ICDI Budapest, 1997.

Выполненные исследования ясно показали, что проведение испытаний на более низких частотах, например на частоте 0,01 Гц вместо 0,1 Гц приводит к значительно меньшей скорости развития электрических триингов. Разница в скорости роста для частот в 0,1 Гц и 0,01 Гц оказывается примерно в 10 раз. Если перевести данный факт применительно к времени проведения испытаний, то это будет означать, что при проведении испытаний на частоте 0,01 Гц время испытаний должно быть увеличено с в 10 раз по сравнению с испытанием на частоте 0,1 Гц. Таким образом, при проведении приемо-сдаточных испытаний это будет означать увеличение времени испытаний с 1 ч до 10 ч при одном и том же испытательном напряжении  $3U_0$ .

В своей исследовательской работе S.H. Moh, "Very low frequency testing-its effectiveness in detecting hidden defects in cables, 17th international conference on electricity distribution, Cired, Barcelona, 2003 подтвердил вывод об эффективности применения метода испытания СНЧ для выявления скрытых дефектов. Испытания, вынужденно проводившиеся на более низких частотах из-за ограниченных возможностей испытательного оборудования, после проведения сравнения результатов показали, что степень отказов после проведения испытаний была в три раза выше по сравнению с испытаниями, проведенными на частоте 0,1 Гц. Более того, данная работа продемонстрировала, что эффективность СНЧ испытаний на частоте 0,1 Гц при напряжении  $3U_0$  более высокая, чем для испытаний, проведенных на частоте в 50 Гц при напряжении  $2U_0$ .

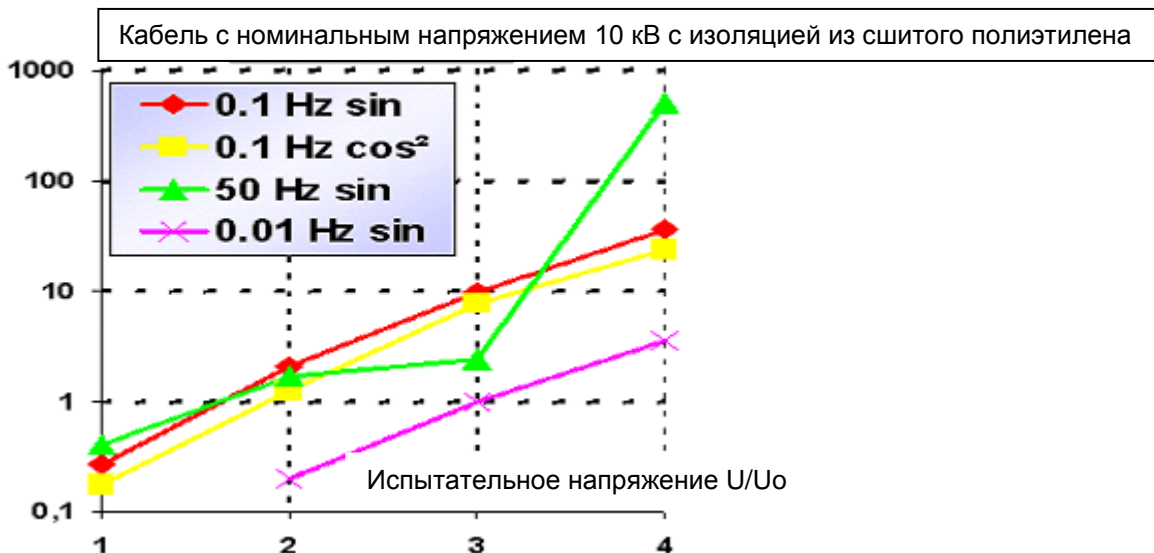


Рис. 6. Степень развития электрических триингов как функция напряжения для нескольких частот и форм напряжения.

#### IV. Практический опыт

##### ПРИМЕР ГОРОДА ДОРТМУНД

Далее приведен пример опыта использования СНЧ испытаний в г. Дортмунд за 10 летний период (1987 – 1998). За указанный период было проконтролировано и испытано более 300 км кабеля, см. Таблицу 1. Если посмотреть на количество отказов, то видно, что большинство отказов произошло на старых кабелях с полимерной изоляцией, в среднем 4,2 отказа на 100 км кабеля.

Таблица 1

Количество отказов, произошедших в процессе испытаний в соответствии с материалами DEW, "Experience report - About 10 years "Voltage on-site Test on Medium Voltage Cable Networks by means of 0.1 Hz Cosine Square Wave Voltage" in the 10kV network in the City of Dortmund, Germany, 1998

	Полимерная изоляция	Бумажная изоляция
Длина испытанной системы	2149	999
Отказы	91	29
Количество отказов на 100 км	4,2	2,9

Если более тщательно проанализировать полученные результаты и изучить распределение повреждений во времени, то можно понять, что 66% повреждений произошло в первые 10 мин испытаний, а 75% повреждений в первые 30 мин, см. рис. 7. При этом 25% повреждений произошло в последние полчаса, что подтверждает необходимость проведения испытаний на протяжении всего часа, рекомендуемого всеми стандартами. Аналогичный опыт был получен и при испытаниях других энергетических объектов.



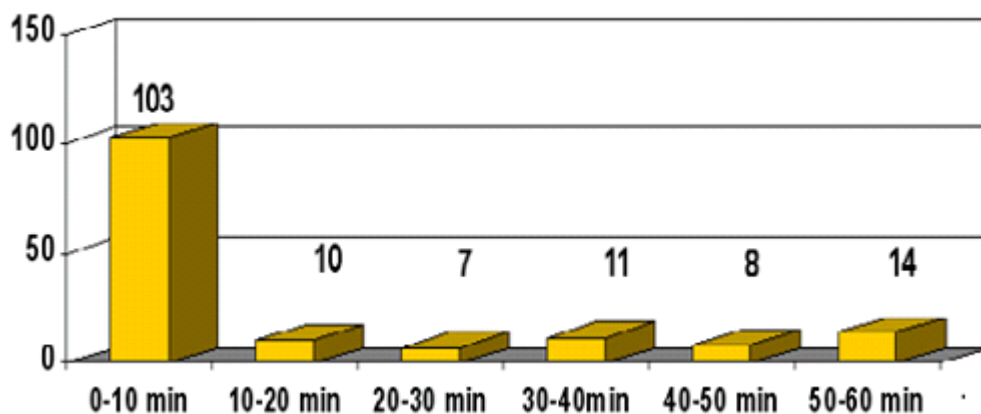
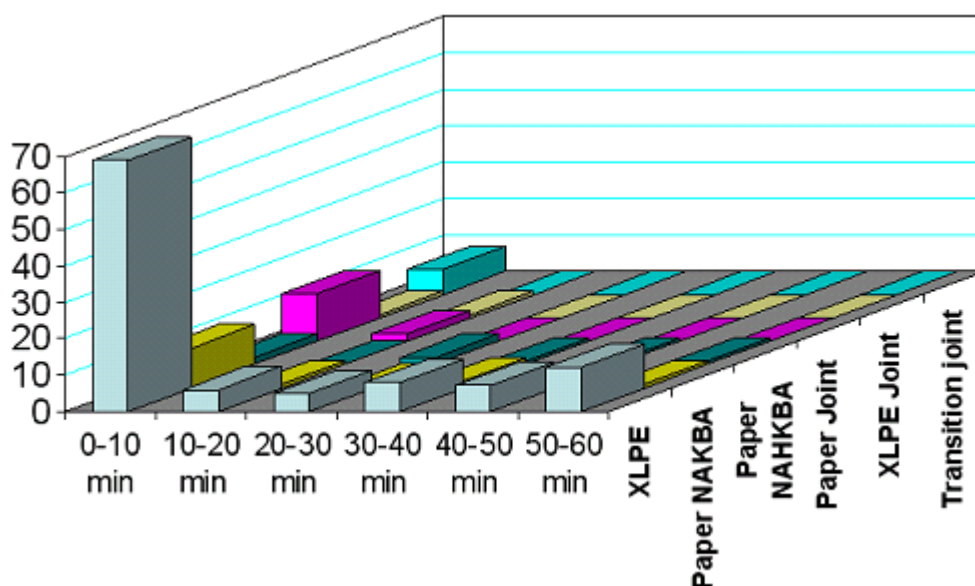


Рис. 7. Количество отказов как функция времени.

Тем не менее, если постараться проанализировать проблему еще более глубоко и попытаться понять, в каких местах произошли повреждения, то можно увидеть, что все повреждения соединений произошли в первые 20 мин испытаний, см. рис. 8. Данное утверждение распространяется на вновь смонтированные кабели, для которых считается, что изоляция – новая, при этом достаточно проводить СНЧ испытание в течение 20 мин.

Большее количество повреждений сшитой полиэтиленовой изоляции вызвано недостаточно хорошей технологией производства первого поколения кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией с графитовым полупроводящим слоем. Современные кабели со сшитой полиэтиленовой изоляцией уже не имеют таких проблем, как аналогичные кабели первого поколения.



- XLPE – кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена
- Paper NAKBA – кабель с пропитанной бумажной изоляцией
- Paper joint – соединительная муфта кабеля с пропитанной бумажной изоляцией
- XLPE joint – соединительная муфта кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена
- Transition joint – переходная муфта

Рис. 8. Количество отказов как функция времени и места расположения повреждения.

## V. ПЕРСПЕКТИВЫ

В настоящее время испытания напряжением СНЧ очень часто комбинируются с диагностикой ЧР. Так, например в Нидерландах, в энергосистемах общего назначения после прокладки кабелей применяются следующие процедуры согласно FR. De Vries, 2009 "Experiences with PD measurements on MV cables in wind farms in the Netherlands" F05D IEEE/ICC meeting, Scottsdale, USA:

1. контроль оболочки
2. проверка прочности кабеля с использованием СНЧ испытаний на частоте 0,1 Гц при напряжении  $3 U_0$ .
3. диагностика ЧР с применением затухающего переменного напряжения (DAC).

Преимущество комбинации методов контроля, а именно диагностики ЧР, проводимой сразу после СНЧ испытаний, заключается в том, что можно обнаружить существенные дефекты проведенных монтажных работ, которые не были выявлены с помощью СНЧ испытаний, и своевременно устранить их. Это позволяет дополнительно повысить надежность сетей электроснабжения и снизить затраты на внеплановые отключения электроснабжения, на недопоставленную энергию (например, когда отключают ветроустановки) или оплату штрафов.

К существенным дефектам проведенных работ могут быть отнесены, например, неполная усадка термоусаживаемых соединений, неправильное удаление внешнего полупроводящего слоя или наличие грязи внутри соединений. Подобные недоделки пройдут незамеченными в процессе СНЧ, но будут выявлены при диагностике ЧР. Если подобные недоделки в работе не будут своевременно устранены, то в ближайшие годы эксплуатации можно ожидать непредвиденных пробоев таких муфт (в зависимости от типа дефекта).



а)



б)

Рис. 9. а) неправильная зачистка изоляции выявленная с помощью диагностики ЧР, позволившая предотвратить пробой;  
б) оставшийся полупроводящий слой.

Обычно после успешного проведения испытания после прокладки кабеля, следующие испытания и диагностика проводятся через 10-15 лет. Другими словами, в указанный период времени не ожидается возникновения каких-либо проблем, если только последние не будут вызваны внешними воздействиями.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние два десятилетия метод испытания напряжением СНЧ доказал свою эффективность при проведении приемо - сдаточных испытаний вновь проложенных кабелей, а также при выполнении технического обслуживания



состарившихся кабелей с целью устранения слабых мест, имеющих критически опасное состояние.

Эволюция базы электронных комплектующих, используемых в энергетике, позволила создать установки, не требующие технического обслуживания, а также обеспечивающих более высокую производительность.

По сравнению с испытаниями на частоте 50 Гц или резонансной, метод испытания напряжением СНЧ показывает лучшие результаты как для выявления повреждений, так и для снижения негативных воздействий на неповрежденную часть испытываемого кабеля.

Эффективность данной методики проявляется только при проведении испытаний на частоте 0,1 Гц. При использовании более низких частот время испытаний возрастает, что и с практической и с экономической точек зрения неудобно и слишком затратно.

Практический опыт показал, что большинство повреждений в местах соединений происходит в первые 20 минут испытаний. Если данный практический опыт применить к вновь проложенным кабелям, то время испытания последних можно сократить до 20 мин вместо рекомендованных 60 мин.

При проведении приемо-сдаточных испытаний метод СНЧ в настоящее время рекомендуется применять в комплексе с проведением диагностики ЧР. Комплексный подход помогает выявить даже незначительные нарушения в технологии и качестве выполненных работ, что, в свою очередь, повышает надежность сетей электроснабжения.