

Сравнение эффективности испытаний кабельных линий с СПЭ изоляцией установками с выходным напряжением различной формы

Германенко Д. В., Русов В. А., ООО «DIMRUS», г. Пермь

Перед вводом в эксплуатацию все высоковольтные кабельные линии с СПЭ изоляцией (международное обозначение XLPE – Cross Linked Polyethylene), должны в обязательном порядке проходить специализированные высоковольтные испытания, имеющие целью определить техническое состояние самого кабеля, концевых и соединительных муфт. Только после успешного проведения таких испытаний можно в будущем ожидать длительной и безаварийной работы кабельной линии.

Стандартные «пусковые» высоковольтные испытания кабельных линий с СПЭ изоляцией являются комплексными, и, как минимум, должны включать в себя три обязательных теста:

- Высоковольтные испытания основной изоляции кабеля и муфт (на изоляционном интервале жила – экран) при номинальном или повышенном напряжении в течение определенного интервала времени – тест на пробой.

- Высоковольтные испытания основной изоляции кабельной линии на номинальном или повышенном напряжении с целью поиска скрытых и развивающихся дефектов в изоляции, проводимые с использованием метода регистрации и анализа частичных разрядов.

- Проверка технического состояния внешней оболочки кабельной линии на наличие повреждений, возникающих при неправильной прокладке.

Высоковольтные испытания кабельной линии на пробой и поиск дефектов в изоляции стараются совместить в общем тесте, так как в обоих случаях измерительная схема предусматривает подачу испытательного напряжения на жилу кабельной линии относительно экрана. Эффективность таких испытаний, как и возможность одновременного проведения двух тестов, определяется типом приложенного испытательного напряжения. Ниже приведено сравнение особенностей проведения испытаний кабельных линий с СПЭ изоляцией с использованием различных типов (форм) испытательных напряжений. Все остальные, не менее важные методические и технические вопросы, например, необходимые и допустимые уровни применяемых напряжений, длительность проводимых испытаний, и т. д., здесь не рассматриваются.

В настоящее время для тестирования состояния кабельных линий с СПЭ изоляцией на практике применяются специализированные высоковольтные испытательные установки с основными пятью типами (формами) выходных напряжений. При помощи этих установок выполняется практическая оперативная оценка технического состояния изоляции кабельных линий перед их вводом в эксплуатацию:

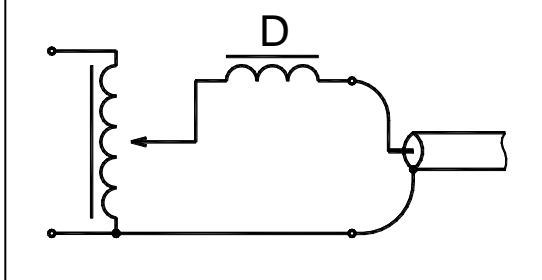
1. Испытание кабельных линий напряжением промышленной частоты.
2. Испытание напряжением СНЧ (сверхнизкая частота) синусоидальной формы.
3. Испытание СНЧ напряжением прямоугольной формы.
4. Испытание затухающим переменным напряжением синусоидальной формы (DAC).
5. Испытание постоянным напряжением.

Не вызывает ни каких сомнений, что оптимальными и наиболее эффективными являются испытания с использованием установок, на выходе которых генерируется напряжение промышленной частоты – в этом случае все физические процессы в кабельной линии будут аналогичны процессам, происходящим в работающей линии. И если кабельная линия выдерживает такие испытания, особенно повышенным напряжением, то, вероятнее всего, она будет долго и безаварийно работать.

Недостатком таких установок является то, что они очень громоздки и очень дороги. По этой причине на практике они применяются достаточно редко.

Для уменьшения мощности повышающего трансформатора в испытательных установках с выходным напряжением промышленной частоты в их составе используются последовательно

Рис. 1. Схема испытательной установки промышленной частоты с компенсационным дросселем.



включенные дополнительные индуктивности, компенсирующую емкостную составляющую потребляемого тока. Как показано на рисунке 1 такой дроссель (индуктивность) включается в высоковольтную цепь последовательно с кабельной линией. В зависимости от емкости контролируемого кабеля (его длины) для повышения компенсирующего влияния величину индуктивности дросселя желательно менять, используя специальные отводы от катушки. Для полной реализации эффекта компенсации емкостного тока кабельной линии величина индуктивности дополнительного дросселя должна быть управляемой.

Использование в испытательной установке компенсирующей индуктивности снижает мощность повышающего трансформатора, но не позволяет существенно снизить габариты и стоимость всей установки, так как сам регулируемый дроссель, работающий под высоким потенциалом источника, является достаточно сложным и дорогим устройством.

Практически однозначно отрицательно можно охарактеризовать потребительские свойства испытательных установок с выходным напряжением постоянного тока. В литературе неоднократно было показано, что при проведении испытаний кабельных линий с СПЭ изоляцией повышенным напряжением применение источников постоянного тока может приводить к необоснованным пробоям СПЭ изоляции, и к снижению технического ресурса эксплуатации кабельных линий. Сравнительная простота и дешевизна этих установок не является определяющим признаком при определении сферы их применения, поэтому не будем даже рассматривать особенности использования испытательных источников постоянного тока.

Наиболее широко на практике сейчас применяются высоковольтные испытательные установки переменного тока, работающие на сверхнизкой частоте – СНЧ (VLF – Very Low Frequency). В большинстве выпускаемых установок эта пониженная частота стандартно равняется 0,1 Гц, т. е. в 500 раз ниже, чем частота промышленной сети, очень часто в установках имеется техническая возможность еще большего ее понижения, до 0,01 Гц.

Причиной использования испытательного напряжения пониженной частоты является то, что кабельная линия представляет собой практически идеальную емкостную нагрузку, для поднятия напряжения на которой необходим источник, обладающий большой реактивной мощностью, который должен генерировать реактивный ток значительной величины. Для сравнения, при испытании кабельных линий среднего класса рабочих напряжений, при длине линии около километра, на промышленной частоте потребуется источник напряжения мощностью в сотни кВА.

Переход на использование напряжения пониженной частоты позволяет на несколько порядков увеличить емкостное сопротивление испытываемой кабельной линии, следовательно, значительно снизить необходимую мощность испытательного источника. В результате, в тех же условиях можно будет применять источники испытательного напряжения с меньшими габаритами и стоимостью. Например, выходной мощности источника испытательного напряжения СНЧ, потребляющего из питающей сети всего 1 – 2 кВт мощности, оказывается достаточно для испытаний большинства кабельных линий среднего класса напряжений.

Основной вопрос, который обсуждается производителями установок СНЧ, заключается в выборе формы выходного напряжения. Одни фирмы, которые производят источники с синусоидальной формой выходного сигнала, утверждают, что это наилучшее техническое решение. Другие фирмы производят источники с выходным напряжением прямоугольной формы, и также говорят о высокой эффективности такого оборудования.

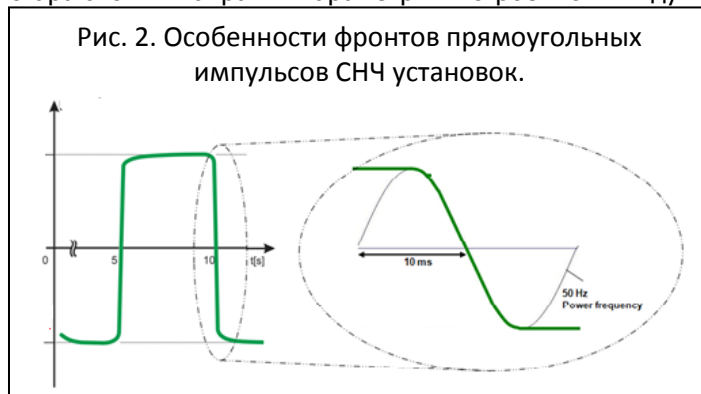
Попробуем рассмотреть этот вопрос немного подробнее. Исторически первыми на рынке появились источники СНЧ напряжения с выходным сигналом прямоугольной формы. При этом авторы почему-то иногда называли, и называют сейчас, этот сигнал косинусоидальным, но такое заявление не правильно. Напряжения с формой сигнала синус и косинус абсолютно идентичны по форме, но

сдвинуты относительно друг друга на угол в 90 электрических градусов, а в данном случае это не соответствует истине.

В основе установок СНЧ с прямоугольным выходным напряжением лежит оригинальное техническое решение, использующее резонансные особенности контура, состоящего из емкости испытываемой кабельной линии, и встроенной в установку резонансной катушки. За счет использования в установке последовательно коммутируемых однополярных переключателей, источник СНЧ прямоугольной формы имеет два важных преимущества:

- Происходит периодическое резонансное перераспределение реактивной энергии в испытательной схеме между емкостью кабеля и индуктивности встроенной катушки с частотой, определяемой управляемыми однополярными переключателями. Энергия сетевого источника установки расходуется только на компенсацию потерь в кабеле, индуктивности, и коммутаторах. В результате при помощи установок СНЧ с прямоугольной формой выходного сигнала можно испытывать кабельные линии с емкостью до десяти микрофарад.

- Изменение полярности напряжения, приложенного к кабельной линии, происходит не мгновенно, а по кривой, по форме пропорциональной половине синусоидального сигнала, расположенного между двумя амплитудными значениями противоположной полярности. Длительность такого интервала времени, в течение которого происходит изменение полярности напряжения, зависит от резонансной частоты колебательного контура, определяется емкостью кабельной линии, и индуктивностью испытательной установки. Производители СНЧ установок стараются выбирать параметры встроенной индуктивности так, чтобы скоростные параметры



изменения полярности испытательного напряжения были близки к параметрам, имеющим место при промышленной частоте. В результате скорости изменения напряженности поля в изоляции испытываемой кабельной линии оказываются очень близкими к имеющим место в рабочих режимах. Это приводит к тому, что при использовании таких установок можно эффективно проводить и регистрацию частичных разрядов с целью выявления

скрытых дефектов в изоляции кабельных линий. Полученные диагностические заключения будут практически полностью соответствовать измерениям частичных разрядов в процессе эксплуатации.

Испытательные установки СНЧ с синусоидальной формой выходного напряжения первоначально основывались на электромеханических элементах, были громоздки и дороги. Развитие полупроводниковых силовых элементов позволило оптимизировать их конструкцию, сделать их компактнее и удобнее. В таких установках сначала производится заряд кабельной линии напряжением одной полярности, затем производится постепенный разряд кабельной линии до нуля, и далее заряд напряжением другой полярности. Закон изменения напряжения на контролируемом кабеле управляется микропроцессорным модулем, что позволяет получить на выходе установки практически идеальный синусоидальный сигнал с заданной частотой, обычно 0,1 Гц.

Основной недостаток такой установки заложен в принципе ее действия – вся энергия, накапливаемая в кабельной линии во время ее заряда, должна быть рассеяна в виде тепла во время спада напряжения на кабельной линии до нуля, или каким-либо способом сохранена в специальном накопителе для последующего повторного использования на следующем периоде испытательного напряжения. Это приводит к тому, что при помощи таких установок (приемлемого компактного размера) не удастся испытать кабельные линии с емкостью более одной микрофарады. Производители таких СНЧ установок заявляют о возможности испытания линий и с большей емкостью, но при этом указывают, что частоту выходного напряжения в таком случае нужно снижать уже до 0,01 Гц. Испытание кабельных линий напряжениями такой частоты, на наш взгляд, уже является опасным для изоляции, так как напряжение одной полярности оказывается приложенным к

кабелю в течение уже почти одной минуты (50 секунд). Имеет место опасное приближение СНЧ установок к испытательным установкам постоянного тока, последствия которого предсказуемы – вероятность необоснованного пробоя, и неизбежное снижение ресурса кабельной линии после проведения испытаний.

Вторым недостатком установки СНЧ с синусоидальным выходным напряжением является то, что скорости нарастания поля в изоляции при частоте 0,1 Гц в 500 раз отличаются от тех скоростей, которые имеют место при работе кабельной линии. Это приводит к тому, что меняется физическая природа процессов, происходящих в изоляции кабельной линии. На поляризационные процессы в диэлектрике накладываются абсорбционные, что изменяет распределение потенциалов внутри изоляции кабельной линии. При частоте испытательного напряжения в 0,01 Гц скорость процессов вообще уменьшается в 5000 раз, что еще больше снижает достоверность диагностики дефектов на основании измерения и анализа частичных разрядов.

В результате возникновения и развития частичных разрядов в изоляции кабеля происходит по другим законам, поэтому часть дефектов в изоляции не может быть диагностирована на основании использования метода регистрации частичных разрядов. По имеющейся в литературе информации, при синусоидальном напряжении 0,1 Гц надежно выявляется от 60 до 80% всех дефектов, выявляемых при использовании напряжения промышленной частоты. Много это или мало – зависит от конкретной ситуации, и от типа дефектов, имеющих место в изоляции испытываемой кабельной линии. В любом случае это является отрицательным фактором при проведении диагностики.

В чем же основной плюс установок СНЧ с синусоидальным выходным сигналом? Многие думают, что в том, что форма их выходного сигнала близка к форме напряжения, которое имеет место при работе кабельных линий. На самом деле это только лишь кажущееся подобие внешних форм, но оно получено с большим коэффициентом временного приведения. На самом же деле скорости изменения электромагнитных и полевых процессов в изоляции кабельной линии при таких испытаниях безгранично далеки от реальных процессов, имеющих место в процессе работы кабельной линии.

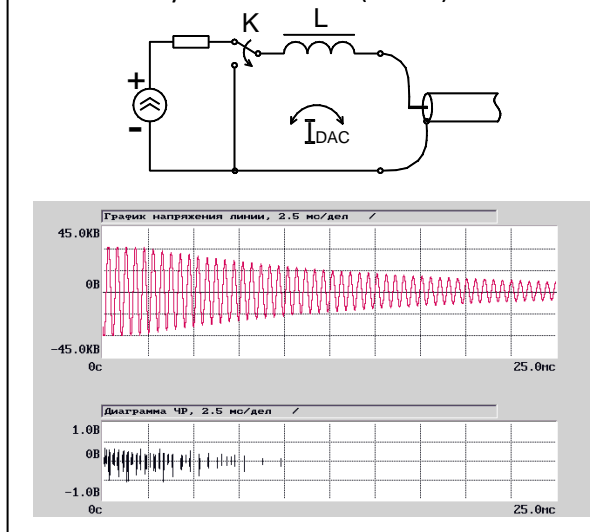
Из положительных аспектов можно отметить, что стоимость СНЧ установок с синусоидальным выходным напряжением в последнее время настолько уменьшилась, что часто она уже меньше, чем стоимость установок с прямоугольным выходным напряжением. Однако надо понимать, что установки с прямоугольным выходным напряжением всегда имеют большую выходную мощность, и позволяют испытывать более длинные кабельные линии. Если сравнивать испытательные установки с равными возможностями, то при прямоугольном выходном сигнале цена поставки диагностического оборудования всегда будет ниже.

В заключение по вопросу выбора оптимальной формы выходного сигнала установок СНЧ следует сказать, что возможно существуют и другие, и может даже более значимые положительные аспекты применения СНЧ установок с синусоидальным выходным напряжением. В очевидном виде обнаружить их в доступной литературе, или, по отзывам эксплуатационных организаций, авторам данного обзора не удалось.

Особую нишу при проведении испытаний кабельных линий на наличие частичных разрядов занимают испытательные установки, выходное напряжение которых является переменным затухающим, имеющим обозначение DAC (Damping Alternative Current). Второе наименование установок этого типа связано с общепринятым названием метода, на основании которого производится диагностика состояния кабельных линий - OWTS (Oscillating Wave Test System). Принцип действия таких установок базируется на использовании резонансных процессов в колебательном контуре, состоящем из емкости кабельной линии и дополнительной индуктивности, расположенной внутри установки.

Перед проведением испытаний кабельная линия заряжается постоянным током небольшой величины, порядка 10 мА, до заданного напряжения, после чего замыкается ключ, который создает замкнутый колебательный контур, в котором возникает переменное затухающее напряжение. Частота колебаний в контуре определяется емкостью кабельной линии (зависит от длины линии), и величиной индуктивности встроеной катушки, а скорость затухания зависит от активных потерь в установке и в

Рис. 2. Принцип работы испытательной установки DAC (OWTS)



кабельной линии, т. е. от добротности колебательного контура. Реальное значение частоты резонансных колебаний контура обычно находится в диапазоне от 50 до 1000 Гц, а полное время затухания колебаний составляет десятые доли секунды.

В процессе затухания амплитуды напряжения производится измерение частичных разрядов в изоляции кабельной линии, выявляются дефекты, производится локация мест их возникновения, определяется напряжение возникновения частичных разрядов. В отличие от других испытательных установок DAC используются практически только для диагностики, проверка на пробой осуществляется только в момент заряда кабельной линии постоянным током. Проводить длительные испытания кабельных линий на пробой

с их помощью невозможно, они максимально приспособлены только для регистрации частичных разрядов в изоляции.

В литературе появилась информация о том, что DAC (OWTS) установки опасны для кабельных линий с СПЭ изоляцией, так как они воздействуют на линию постоянным током во время первичного заряда, что отрицательно сказывается на ресурсе СПЭ изоляции. Такие заявления не имеют под собой серьезного основания. Для примера, OWTS установки большинства производителей могут зарядить длинную кабельную линию емкостью до 10 микрофард за время, не превышающее 10 – 15 секунд, а для кабелей меньшей длины, порядка одного километра, время заряда составляет единицы секунд, после чего замыкается ключ и начинается воздействие на кабель переменным затухающим напряжением.

Время заряда короткой кабельной линии, т. е. время нахождения под напряжением положительной полярности, соизмеримо с аналогичным параметром установок СНЧ 0,1 Гц, где оно составляет 5 секунд, а тем более оно много меньше, чем при использовании СНЧ 0,01 Гц (для линий большой длины), где оно составляет уже 50! секунд. Кроме того также надо учесть, что при испытании СНЧ установками приложенное к кабельной линии напряжение равняется $3U_0$, а при использовании DAC установок оно обычно ограничивается уровнем амплитуды рабочего напряжения. В результате становится очевидным, что испытание кабельных линий DAC установками даже менее вредны для кабельных линий с СПЭ изоляцией, чем испытания широко используемыми установками СНЧ.

Измерение частичных разрядов является обязательным при вводе в эксплуатацию кабельных линий с СПЭ изоляцией, потому что оно позволяет выявить те небольшие дефекты, которые имеются в кабельной линии. Особенно это важно для тех дефектов начального уровня, которые не были выявлены при испытании повышенным напряжением, но могут привести к выходу из строя линии в течение первого этапа промышленной эксплуатации, на интервале в ближайшие несколько месяцев. Поскольку для проведения такого теста необходимо, чтобы на кабельную линию было подано напряжение не меньшее, чем рабочее значение, желательно регистрировать частичные разряды во время проведения испытаний на пробой, совмещать их. В зависимости от формы выходного напряжения испытательных установок условия и возможности для регистрации частичных разрядов различны.

Наиболее эффективно регистрация частичных разрядов может быть произведена при использовании источников напряжения промышленной частоты. Удобно применение для регистрации частичных разрядов установок типа DAC (OWTS), они максимально предназначены для этой цели. Более сложно проводить измерение частичных разрядов при использовании СНЧ установок. Причина здесь достаточно проста – управляющие сигналы для полупроводниковых транзисторов и тиристорных,

составляющие основу высоковольтной части испытательной установки СНЧ, являются сигналами помех при регистрации частичных разрядов, поэтому приходится применять дополнительные меры по снижению уровня помех при регистрации частичных разрядов.

Более просто и эффективно измерить частичные разряды можно при использовании установок с прямоугольным выходным СНЧ напряжением, технически сложнее измерить частичные разряды при использовании синусоидальных СНЧ установок, причем достоверность диагностических заключений в этом случае, как уже указывалось выше, будет существенно ниже.

Все приведенные выше рассуждения об эффективности применения для кабельных линий с СПЭ изоляцией испытательных установок, различающихся типом выходного напряжения, приведены в таблице. Поскольку данная статья не носит рекламной направленности, все сравнения в таблице приведены на уровне «больше – меньше», или «лучше - хуже».

№	Тип выходного напряжения установки	Эффективность		Влияние на ресурс изоляции	Удобство применения	
		Испытание на пробой	Измерение ЧР в изоляции		Габариты	Цена
1	Синусоидальное 50 Гц	+++	+++	Минимум	+++	+++
2	Прямоугольное СНЧ	++	++	Среднее	++	++
3	Синусоидальное СНЧ	++	+	Среднее	++	++
4	DAC затухающее	+	+++	Среднее	++	++
5	Постоянный ток	++	-	Максимум	++	+

На основании информации, приведенной в таблице, пользователи могут более обоснованно проводить выбор диагностических установок, которые в максимальной степени будут соответствовать требованиям эксплуатации.

Совмещение функций СНЧ установок для испытаний с функциями измерения частичных разрядов в изоляции кабельных линий является важным направлением развития испытательных установок для большинства фирм, специализирующихся на выпуске такого оборудования. Наиболее интересными сочетаниями функциональных возможностей компактных испытательных установок являются:

- СНЧ установка с прямоугольным (синусоидальным) выходным сигналом + система регистрации частичных разрядов.
- СНЧ установка с прямоугольным выходным сигналом + установка OWTS.

Испытательные установки таких типов уже появляются на рынке, причем лучшие из них могут, дополнительно к испытаниям на пробой и измерениям частичных разрядов, осуществлять контроль состояния оболочки кабельной линии.