

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИКА ИСПЫТАНИЙ КАБЕЛЕЙ

Бас Верхувен,

Высоковольтная лаборатория КЕМА, Нидерланды

Кабели среднего и высокого напряжения обычно используются в электрических сетях для передачи электроэнергии между подстанциями. Миллионы километров кабелей среднего и высокого напряжения проложены в разных странах, их использование приобретает все большую популярность. Главным преимуществом представляется возможность передавать электроэнергию в густо населенные районы, где протянуть воздушные линии невозможно из-за ограниченного пространства и экологических ограничений.

Традиционно для электроснабжения используются кабели с пропитанной бумажной изоляцией. В последние десятилетия прошлого века появились новые изоляционные материалы, среди которых наибольшее распространение получил сшитый полиэтилен (СПЭ).

Возрастающий спрос на максимально надежную энергетическую инфраструктуру повлек за собой повышенные требования к качеству кабельной продукции. Чем выше класс напряжения кабеля, тем больше людей и организаций от него зависят. Отказ высоковольтного кабеля может оставить без энергоснабжения целый город; при отказе кабеля среднего напряжения обесточенная территория будет иметь меньшие масштабы.

Важным стимулом к развитию кабельной промышленности является потребность в снижении стоимости километра кабеля и стоимости комплекта арматуры.

Тщательную оценку кабелей и арматуры следует осуществлять до их применения в энергетической инфраструктуре. Для этих целей используются стандарты по испытаниям и измерениям электрических и неэлектрических характеристик кабелей.

В данной статье рассматривается процесс стандартизации, принятый в мире. Опыт как удачной, так

и неудачной сертификации подтверждает ее необходимость. Главное внимание в статье уделяется испытаниям кабелей, но также освещаются вопросы, связанные с кабельной арматурой, такой как соединительные муфты, элегазовые вводы, концевые муфты наружной и внутренней установки.

Международные стандарты испытаний кабелей

В настоящее время действует целый ряд стандартов для испытаний кабелей и арматуры. Наиболее часто используемые стандарты – это стандарты Международной электротехнической комиссии (МЭК). Технические комитеты МЭК готовят проекты стандартов в мировом масштабе с участием представителей энергетических компаний, производителей кабелей и арматуры, испытательных центров. Европа имеет давние традиции в области стандартизации, и многие государственные стандарты объединились в стандарты CENELEC; в Америке действуют стандарты ANSI/IEEE. В некоторых странах государственные стандарты применяются наряду с международными.

Анализ этих документов позволяет заключить, что национальные стандарты содержат более жесткие требования по сравнению с европейскими, а европейские стандарты, в свою очередь, становятся более требовательными, чем мировые, такие как стандарты МЭК.

Большие усилия прилагаются для того, чтобы объединить требования стандартов МЭК и CENELEC. Если для конкретного случая отсутствует стандарт CENELEC, но имеется стандарт МЭК, то стандарт МЭК принимается в качестве стандарта CENELEC и наобо-

Таблица 1

Стандарты	Напряжения		
	Средние (1–36 кВ)	Высокие (36–170 кВ)	Ультравысокие (170–500 кВ)
МЭК	МЭК 60502–2 МЭК 60502–4	МЭК 60840	МЭК 62067
CENELEC	HD 620 HD 629.1	HD 632	МЭК 62067

Таблица 2

Обзор программ испытаний кабелей, основанных на стандартах МЭК

Содержание испытаний	Цель испытаний	Среднее напряжение МЭК 60502-2	Высокое напряжение МЭК 60840	Ультравысокое напряжение МЭК 62067
Испытание на изгиб	Моделирование механических напряжений, возникающих в кабеле при прокладке	3-кратное навивание кабеля на оправку в двух направлениях. Диаметр оправки определяется размерами и конструкцией кабеля	3-кратное навивание кабеля на оправку в двух направлениях. Диаметр оправки определяется размерами и конструкцией кабеля	3-кратное навивание кабеля на оправку в двух направлениях. Диаметр оправки определяется размерами и конструкцией кабеля
Измерение уровня частичных разрядов	Обнаружение полостей в изоляции, в том числе на границе раздела между изоляцией и электропроводящими экранами	Плавный подъем напряжения до уровня $2 U_0$, выдержка в течение 10 с и медленное снижение до уровня $1,73 U_0$. Уровень частичных разрядов не должен превышать установленную чувствительность, равную 5 пкЛ	Плавный подъем напряжения до уровня $1,7 U_0$, выдержка в течение 10 с и медленное снижение до уровня $1,5 U_0$. Уровень частичных разрядов не должен превышать установленную чувствительность, равную 5 пкЛ	Плавный подъем напряжения до уровня $1,7 U_0$, выдержка в течение 10 с и медленное снижение до уровня $1,5 U_0$. Уровень частичных разрядов не должен превышать установленную чувствительность, равную 5 пкЛ
Измерение тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$)	Проверка качества и степени дегазации изоляции	Нагрев жилы до температуры, превышающей максимально допустимую температуру в нормальном режиме на $5-10^\circ\text{C}$. Значение $\tan \delta$ не должно быть более $40 \cdot 10^{-4}$	Нагрев жилы до температуры, превышающей максимально допустимую температуру в нормальном режиме на $5-10^\circ\text{C}$. Значение $\tan \delta$ не должно быть более $10 \cdot 10^{-4}$	Нагрев жилы до температуры, превышающей максимально допустимую температуру в нормальном режиме на $5-10^\circ\text{C}$. Значение $\tan \delta$ не должно быть более $10 \cdot 10^{-4}$
Испытание циклами нагрева	Термическое нагружение кабеля путем приложения 20 суточных циклов нагрева / охлаждения	Нагрев жилы до температуры, превышающей максимально допустимую температуру в нормальном режиме на $5-10^\circ\text{C}$, и поддержание указанной температуры в установленных пределах не менее 2 ч для каждого цикла нагрева. Электрическое напряжение на кабель не подается. Количество циклов – 20	Нагрев жилы до температуры, превышающей максимально допустимую температуру в нормальном режиме на $5-10^\circ\text{C}$, и поддержание указанной температуры в установленных пределах не менее 2 ч для каждого цикла нагрева. К кабелю прикладывается напряжение, равное $2 U_0$. Количество циклов – 20.	Нагрев жилы до температуры, превышающей максимально допустимую температуру в нормальном режиме, и приложение 10 положительных и 10 отрицательных коммутационных импульсов
Испытания коммутационными импульсами для кабелей напряжением свыше 300 кВ	Оценка стойкости к действию положительных и отрицательных коммутационных импульсов	—	—	Нагрев жилы до температуры, на $5-10^\circ\text{C}$ превышающей максимально допустимую в нормальном режиме, и приложение 10 положительных и 10 отрицательных коммутационных импульсов
Испытание грозовыми импульсами	Оценка стойкости к действию положительных и отрицательных грозовых импульсов	Нагрев жилы до температуры, на $5-10^\circ\text{C}$ превышающей максимально допустимую в нормальном режиме, и приложение 10 положительных и 10 отрицательных грозовых импульсов	Нагрев жилы до температуры, на $5-10^\circ\text{C}$ превышающей максимально допустимую в нормальном режиме, и приложение 10 положительных и 10 отрицательных грозовых импульсов	Нагрев жилы до температуры, на $5-10^\circ\text{C}$ превышающей максимально допустимую в нормальном режиме, и приложение 10 положительных и 10 отрицательных грозовых импульсов
Испытание переменным напряжением	Оценка стойкости к действию переменного напряжения большой амплитуды	Приложение напряжения величиной $4 U_0$ в течение 4 ч	Приложение напряжения величиной $2,5 U_0$ в течение 15 мин.	Приложение напряжения величиной $2 U_0$ в течение 15 мин.
Неэлектрические типовые испытания	Различные виды испытаний и проверок конструкций и материалов	В соответствии со стандартом	В соответствии со стандартом	В соответствии со стандартом
Преквалификационные испытания	Длительные испытания на подтверждение срока службы	—	В стадии разработки	Испытания в течение 1 года при непрерывном приложении напряжения $1,7 U_0$ и циклах нагрузки (по 2 суток)

* U_0 – номинальное фазное напряжение.

рот. Эти совместные действия МЭК и CENELEC оговорены в так называемом Дрезденском соглашении.

В табл. 1 приводятся современные стандарты для кабелей и арматуры с полимерной изоляцией.

Недавние издания МЭК 60840 и МЭК 62067 основаны на системном подходе, предусматривающем совместные испытания кабелей и арматуры. Опыт показывает, что испытания кабеля в комбинации с арматурой более эффективны, чем отдельная сертификация кабеля и арматуры. Для указанных классов напряжения совместимость кабеля и арматуры критически важна.

Сравнение стандартов

Все стандарты содержат требования как по электрическим характеристикам кабелей и материалов, так и по неэлектрическим. Арматура же испытывается на предмет соответствия требованиям лишь электрических свойств.

В табл. 2 приводится характерная последовательность проведения испытаний в соответствии со стандартами МЭК для кабелей среднего, высокого и ультравысокого напряжения. Интересно отметить, что для кабелей среднего напряжения испытания циклами нагрузки не требуют приложения напряжения между жилой и экраном, в то время как для кабелей высокого и ультравысокого напряжения предусмотрено испытательное напряжение, равное удвоенному номинальному.

Порядок проведения испытаний по стандарту CENELEC не слишком отличается от порядка испытаний по МЭК, но уровень воздействий выше и испытание циклами нагрузки включает больше циклов, чем испытание по МЭК, которое содержит 20 суточных циклов.

Остальные (национальные) стандарты более или менее сопоставимы. Некоторые из них имеют очень низкие требования по тангенсу угла диэлектрических

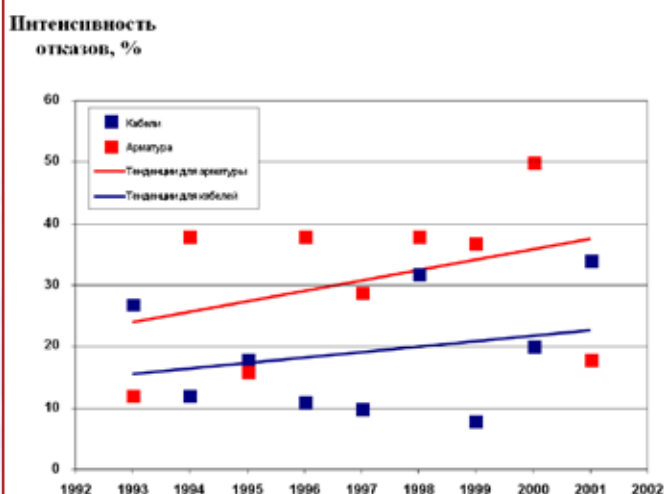


Рис. 2. Рост интенсивности отказов в процессе испытаний за последние 10 лет

потерь ($\tan \delta$) или требуют контроля емкости и $\tan \delta$ на разных этапах испытаний циклами нагрузки.

Опыт проведения испытаний

Опыт проведения типовых испытаний кабелей и арматуры показывает высокую интенсивность отказов. В течение многих лет КЕМА проводила типовые испытания кабелей и арматуры, и было установлено множество причин, по которым эта продукция выходит из строя. На рис. 1 показана доля пробоев кабелей и различных видов арматуры (в процентах). Цифры основываются на большой выборке и включают в себя только результаты типовых испытаний.

Как следует из рис. 1, доля отказов кабелей составляет 18 %. Доля кабельной арматуры, в особенности соединительных муфт, гораздо выше и может достигать до 50 %. Высокий процент пробоев среди соединительных муфт объясняется высоким значением напряженности электрического поля в выравнивающем конусе, что характерно для компактной конструкции муфт. Для концевых муфт компактная конструкция менее типична, что отражается на проценте отказов, сравнимом с процентом отказов кабелей.

На рис. 2 проиллюстрирована интенсивность отказов, отмеченная за последние 10 лет. Процент отказов у кабелей ниже, чем у арматуры, но, что более важно, наблюдается тенденция его роста. Это противоречит ожиданиям, связанным с накоплением опыта и разработкой новых материалов. Несмотря на то что объем знаний об изделиях существенно возрос и стали доступны более совершенные материалы, необходимость снижения стоимости продукции, приводящая к использованию меньшего количества и/или более дешевого материала, отрицательно сказывается на качестве.

Доля отказов, %

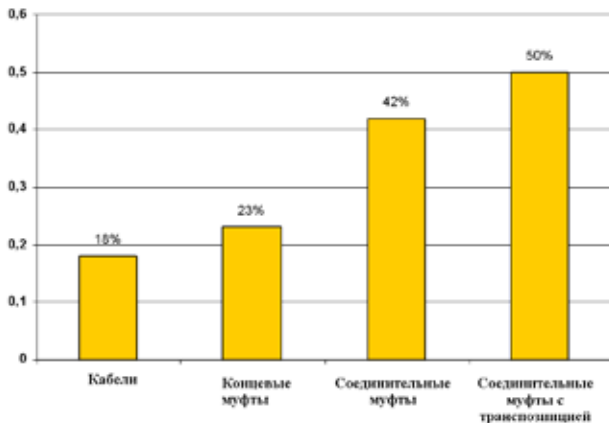


Рис. 1. Доля отказов кабеля и различных типов арматуры, выявляемая в процессе типовых испытаний

Испытания на стойкость к водным триингам по программе Cenelec

Кабели с изоляцией из СПЭ прокладывались с начала семидесятых годов прошлого века. После нескольких лет эксплуатации они начали от случая к случаю выходить из строя. Исследования показали, что причина преждевременных отказов – развитие водных триингов в изоляции.

Водные триинги – это структуры электрохимического разрушения СПЭ, которые развиваются в направлении электрического поля. Триинги растут медленно, например, может понадобиться 10 или 20 лет, чтобы длина триинга могла достичь 30 % от толщины изоляции. Водные триинги зарождаются под действием электрического поля и воды на инородных частицах в СПЭ. В силовом кабеле невозможно полностью избежать загрязнений и устранить электрическое поле. Поэтому единственный способ остановить рост водных триингов – предотвратить влияние воды. Это может быть обеспечено путем введения в СПЭ специальных добавок и включения водонепроницаемых барьеров в конструкцию кабеля. Барьеры могут быть из металлической фольги, водоблокирующей ленты и т.д.

Существуют два типа водных триингов.

Триинги типа «веер» имеют тенденцию неуклонно расти и достигать 100 % толщины изоляции. Они считаются опасными, так как могут служить причиной электрического пробоя кабеля.

Триинги типа «бант» на первой стадии растут с большой скоростью и могут достигать 25 % толщины изоляции. Эти триинги обычно опасности не представляют*.

Единственным стандартом, который включает в себя испытание на стойкость к водным триингам, является стандарт CENELEC HD 620. Данное испытание предусматривает старение кабеля под напряжением в воде. После определенного времени старения кабель разрезают на несколько образцов и затем производят ступенчатое испытание напряжением на пробой. Уровень электрической прочности кабеля, содержащего водные триинги, значительно ниже, чем уровень прочности кабеля в исходном состоянии.

Рост водных триингов – процесс медленный, и на старение может уйти значительное время. Стандарт HD 620 представляет два метода испытаний:

- под напряжением промышленной частоты – 50 Гц (испытание занимает 2 года);
- с использованием повышенной частоты – 500 Гц (испытание занимает всего 4 месяца).

При использовании более высокой частоты старение происходит быстрее. Исследования показали, что коэффициент ускорения при переходе от 50 к 500 Гц равен приблизительно 6–8. Дальнейшее повышение частоты еще сильнее ускоряет про-

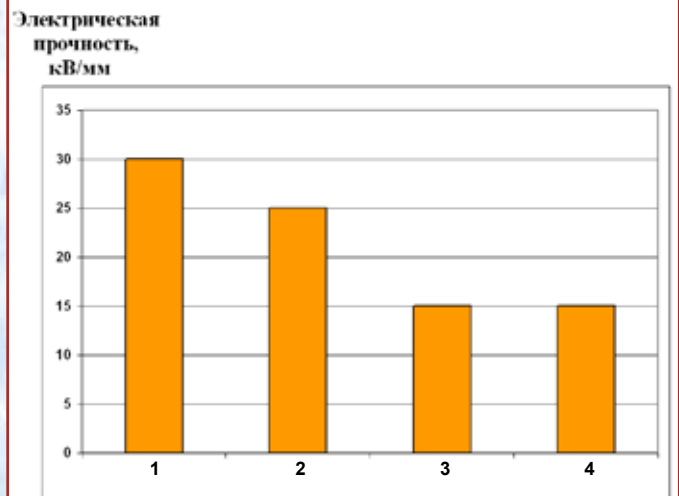


Рис. 3. Электрическая прочность кабеля, соответствующая вероятности пробоя 63 % (параметр масштаба распределения Вейбулла):

- 1 – кабель до старения;
- 2–4 – кабель, состаренный при следующих условиях:
- 2 – 50 Гц, 2,5 U₀, 3500 часов;
- 3 – 500 Гц, 2,5 U₀, 3000 часов;
- 4 – в эксплуатации в течение 10 лет

цесс старения; тем не менее использование 1000 Гц, к примеру, достаточно нерационально из-за возрастания емкостного тока.

Для проведения испытания на стойкость к водным триингам требуется кабель длиной примерно в 150 метров.

Многочисленные исследования показали, что результаты старения при 500 Гц в течение 4 месяцев эквивалентны результатам старения при 50 Гц в течение двух лет. На рис. 3 показана 63%-ная электрическая прочность кабеля, состаренного в разных условиях. Данный кабель находился в эксплуатации 10 лет; в течение этого же времени в запасе хранился барабан с точно таким же кабелем. Для последнего была определена электрическая прочность, которая при вероятности 63 % составила 30 кВ/мм. Также была извлечена и подвергнута испытаниям часть кабеля, находившегося в эксплуатации; для этого кабеля уровень прочности (параметр масштаба) составил 15 кВ/мм. Два фрагмента кабеля с барабана были состарены при частоте 50 и 500 Гц. Данные по электрической прочности для кабеля, состаренного при частоте 500 Гц, соответствуют данным, полученным для кабеля после 10 лет эксплуатации, в то время как кабель, состаренный при 50 Гц, по уровню прочности занял промежуточное положение между кабелем, не подвергавшимся старению, и кабелем, состаренным в эксплуатации. Если бы испытания при частоте 50 Гц были завершены в течение двух лет, результаты были бы таки-

* Опыт, однако, показывает, что водные триинги типа «бант» также могут быть причиной пробоя. – Прим. ред. перевода.

ми же, как и для кабеля, отработавшего 10 лет. Этот и другие результаты показывают, что старение при частоте 500 Гц технически оправдано. Главным преимуществом испытаний при частоте 500 Гц является их продолжительность.

Закключение

Использование высококачественных кабелей и кабельной арматуры играет решающую роль, когда речь идет о надежности электрических сетей. Для проверки качества кабелей и арматуры существуют многочисленные национальные и международные стандарты.

Опыт типовых испытаний показывает, что процент отказов достаточно высок. Для кабелей он составляет около 18 %, а для арматуры достигает 50 %. Ситуация за последние 10 лет не улучшилась. Снижение стоимости продукции, связанное со снижением качества материалов и упрощением конструкций, уменьшило положительный эффект от появления на рынке улучшенных материалов и накопления опыта конструирования и производства.



Тел. (495) 105-6336
(многоканальный)

Кабель
• силовой
• сигнально-блокировочный
• контрольный
• связи
• и многое другое
(3000 наименований)



Электротехника
• аппараты защиты
• переключатели
• для монтажа электропроводки
• электрощитовое оборудование
• осветительное оборудование
• и многое другое

На рынке
с 1991 года

Склады
в Москве

www.stnd.ru
info@stnd.ru



**ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА»
ЧЕРЕЗ РЕДАКЦИЮ на I полугодие 2006 г. (3 номера)**

Стоимость подписки (без учета НДС – 18%):

для членов Ассоциации «Электрокабель» – 450 руб.
для учебных заведений и студентов – 300 руб.
для остальных подписчиков России и стран СНГ – 600 руб.
для подписчиков других зарубежных стран – € 30

**По вопросам подписки обращайтесь
к Алле Евгеньевне Тимофеевой: (495) 918-1627**

Копию платежного поручения с отметкой банка об исполнении для юридических лиц или квитанцию почтового перевода для физических лиц вышлите, пожалуйста, по адресу: ООО «Провода и кабели», Россия, 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, офис 1202. E-mail: kp@vniikp.ru

To subscribe please return this coupon and payment confirmation to:
«Wires and cables» Ltd. Co.
Office 1202, Entuziastov shosse, 5, Moscow, 111024, Russia.
Price of the 6 month subscription (3 editions) outside Russia/CIS: € 30

**Реквизиты для
оплаты в рублях:**

ИНН 7722159427;
КПП 772201001;
ОКОНХ 87100
р/с: 40702810238120102932
в Лефортовском ОСБ 6901
Сбербанк России, г. Москва,
к/с: 30101810400000000225
БИК 044525225;
ОКПО 18711078.

Подписной индекс в каталоге агентства «Роспечать» – **79943**