



Проблематика оценки технического состояния и остаточного ресурса силовых кабельных линий 6-35 кВ

Ширковец Андрей Игоревич,
Михайловский Геннадий Геннадьевич
ООО «Болид», Новосибирск
17.04.2025

Актуальность управления техническим состоянием силовых КЛ

1. Высокая стоимость перерывов электроснабжения из-за отказов электрооборудования (нарушения и остановки технологических агрегатов, особенно на непрерывных производствах, отключения бытовых и промышленных потребителей)
2. Влияние любого повреждения КЛ в распределительной сети 35 кВ на последствия технологического нарушения - тяжесть аварийного события.
3. Необходимость сбережения ресурса КЛ, в первую очередь отключением СПЭ-кабелей при всех видах пробоя.

***СПЭ является горючим материалом!**

Кислородный индекс СПЭ - 18,4

(у нг-оболочек – не ниже 40)

□ Уд.теплота сгорания СПЭ - 46,5 МДж/кг

□ ...керосина - 41 МДж/кг

□ ...дизельного топлива - 42,7 - МДж/кг

Удельная среднегодовая повреждаемость

□ **БПИ-кабелей** - 6 – 17 повр./100 км/год
(многолетняя статистика ВНИИКП)

□ **СПЭ-кабелей** – 0,1 – 4,0 повр./100 км/год
(многолетняя , но не новая статистика ОЭК, Ленэнерго, МКС, Газпром)



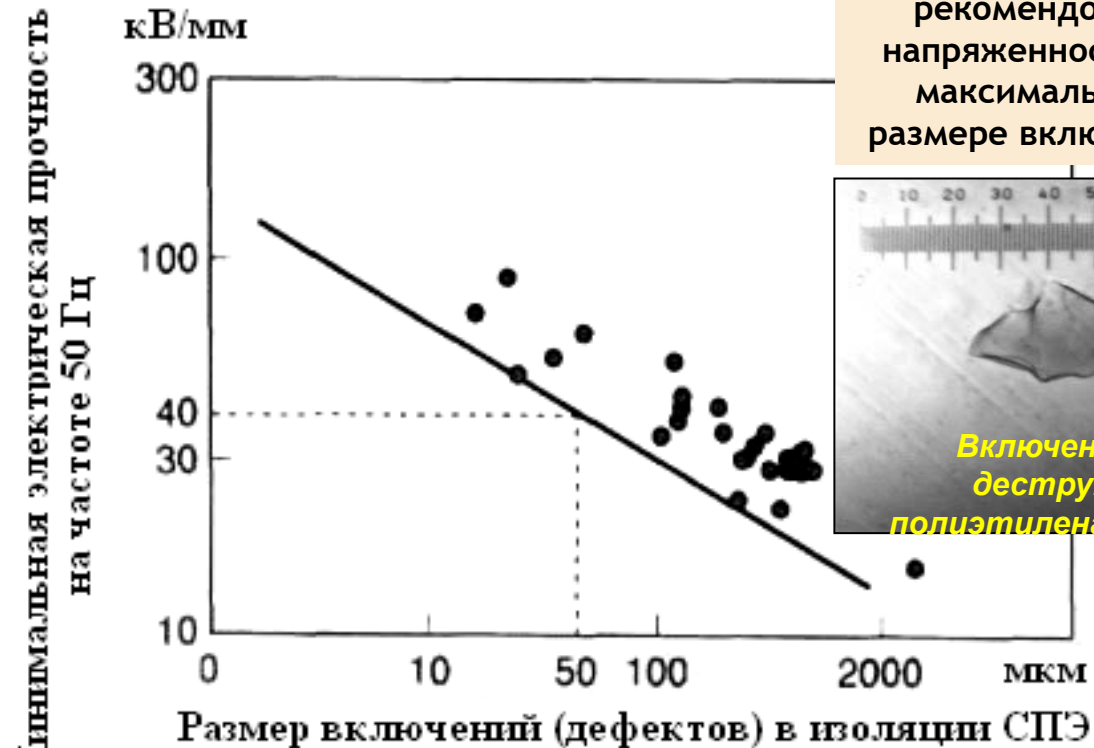
**ОЗЗ → КЗ
ЧЕРЕЗ 48 СЕК**

Причины повреждений

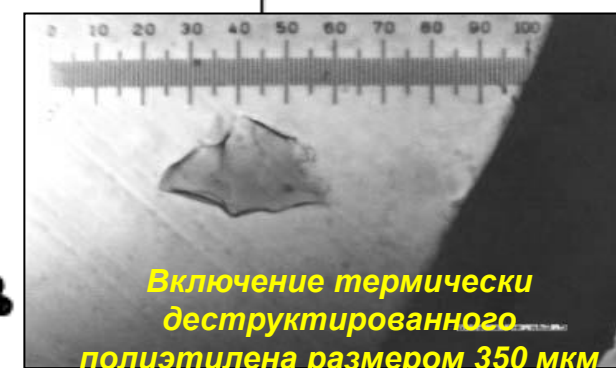
**≈ 60% электрические (из них 90% - КМ и СМ),
≈ 40% - механические (рвут кабели).**

Основные свойства СПЭ как изоляционного материала

1. Электрическая прочность на переменном напряжении
 - ❖ 30-40 кВ/мм для кабелей 6-35 кВ
 - ❖ 60-70 кВ/мм для кабелей 110-500 кВ
2. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon < 2,6$
4. Диэлектрические потери $\text{tg}\delta = 10^{-3}$ при 20 °С и снижается на порядок при нагревании до 90-100 °С
5. Уровень ЧР, измеряемый в «клетке Фарадея» на строительных длинах новых кабелей - не более 5,0-10,0 пКл по нормам ГОСТ 34834-2022.



Sumitomo Electric (Япония) рекомендована расчетная напряженность **40 кВ/мм** при максимально допустимом размере включений **до 50 мкм***



*ГОСТ нормирует:

- ❖ для кабелей до 35 кВ размер включений/дефектов **до 200 мкм**
- ❖ для кабелей 110-500 кВ - **до 80 мкм**

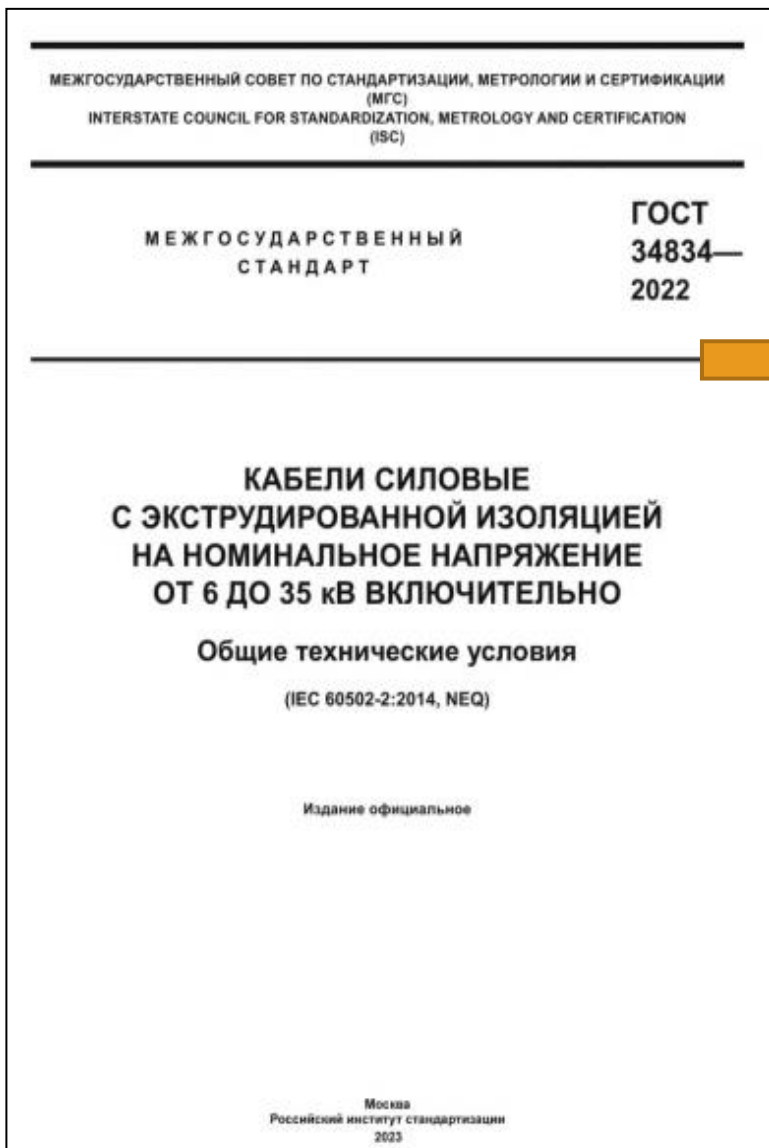
Пробивное напряжение кабельной изоляции по данным исследований ВНИИКП

- в 2003 - 2006 гг. СПЭ кабели
- в 1980 - 1983 гг. БПИ кабели

№ п/п	Показатели электрической прочности кабелей: на номинальное напряжение 10 кВ	Кабели с изоляцией из сшитого ПЭ	Кабели с пропитанной бумажной изоляцией
1.	Пробивное напряжение кабелей в исходном состоянии, кВ (U_0) U_0 -фазное напряжение, частота 50 Гц	180-240 (30-40) U_0	80-90 (13,3-15) U_0
2.	Пробивное напряжение кабелей после ускоренного старения, кВ (U_0): – в воде при напряжении $3U_0$ в течение 17500 ч (2 года);	108-129 (18-21,5) U_0	–
	– циклами нагрева в течение 10000ч при напряжении $3U_0$ при температурах: 70°C 80°C* 90°C		~55 (9,2 U_0) ~30(5 U_0) ~25(4,2 U_0)
* эквивалентно 40 годам эксплуатации при номинальном напряжении и температуре жилы 70 °C			



Нормативы высоковольтных испытаний КЛ с СПЭ изоляцией



$U_0/U_{ном}$, кВ	Форма напряжения СНЧ	Испытательное напряжение частотой 0,1 Гц, кВ _{действ} /кВ _{ампл} при времени его приложения 60 мин ¹⁾	Испытательное напряжение частотой 50 Гц ²⁾ , кВ _{действ}
			U_0 - 24 часа, или $2U_0$ - 60 мин
3,5/6	SIN ³⁾	11 _{действ} /15 _{ампл}	3,5 кВ - 24 часа, или 7 кВ - 60 мин
	COS прямоугольный	15	
6/10	SIN ³⁾	18 _{действ} /25 _{ампл}	6 кВ - 24 часа, или 12 кВ - 60 мин
	COS прямоугольный	25	
12/20	SIN ³⁾	36 _{действ} /50 _{ампл}	12 кВ - 24 часа, или 24 кВ - 60 мин
	COS прямоугольный	50	
20/35	SIN ³⁾	60 _{действ} /85 _{ампл}	20 кВ - 24 часа, или 40 кВ - 60 мин
	COS прямоугольный	85	

Библиотека Нормативных Документов

ОБЪЕМ И НОРМЫ
ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

СТО 34.01-23.1-001-2017

1145

Москва

В процессе эксплуатации испытания КЛ 6-35 кВ проводятся через год после ввода в эксплуатацию, а в дальнейшем:

- для КЛ с пластмассовой изоляцией, у которых в течение первых двух лет не наблюдалось аварийных пробоев и пробоев при профилактических испытаниях – не реже 1 раза в 9 лет;
- для КЛ с пластмассовой и бумажной пропитанной изоляцией, на трассах которых производились строительные и ремонтные работы и на которых систематически происходят аварийные пробой изоляции - непосредственно после выполнения аварийно-восстановительных работ и далее 1 раз в год.

ГОСТ 34834-2022. Испытания кабелей на заводе

существенно жестче, чем $3U_0$ в эксплуатации

8.3.9 Проверку уровня пробивного переменного напряжения частотой 50 Гц изоляции (см. 5.2.2.12) проводят на пяти образцах одножильного кабеля на номинальное напряжение 10 кВ с токопроводящей жилой номинальным сечением от 120 до 240 мм², длиной не менее 10 м каждый, не считая концевых разделок.



Образцы подвергают воздействию переменного напряжения по ГОСТ 2990 при ступенчатом повышении напряжения до пробоя изоляции. Значение переменного напряжения на первой ступени — $3U_0$, повышение напряжения на каждой последующей ступени должно быть равным U_0 . Продолжительность воздействия напряжения на каждой ступени — не менее 5 мин.

$$\rightarrow 3U_0 = 18 \text{ кВ}$$

Если пробоя изоляции не произойдет при напряжении $35U_0$, то испытание прекращают, а за значение пробивного напряжения принимают значение $36U_0$.

$$36U_0 = 216 \text{ кВ}$$

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена считают выдержавшими испытание, если все образцы имеют значение пробивного напряжения не менее $25U_0$, значение пробивного напряжения, определяемое статистической обработкой результатов испытаний пяти образцов на основе распределения Вейбулла при вероятности 0,632, не менее $30U_0$.

$$25U_0 = 150 \text{ кВ}$$

Кабели с изоляцией из этиленпропиленовой резины считают выдержавшими испытание, если все образцы имеют значение пробивного напряжения не менее $15U_0$, значение пробивного напряжения, определяемое статистической обработкой результатов испытаний пяти образцов на основе распределения Вейбулла при вероятности 0,632, не менее $20U_0$.

$$15U_0 = 90 \text{ кВ}$$

Результаты испытания распространяют на кабели всех типоразмеров номинальным напряжением от 10 до 35 кВ.

$$U_{ном}=10 \text{ кВ}, \\ U_0=6 \text{ кВ}$$

Номинальное напряжение кабеля

60502-2 © IEC:2005

– 23 –

The rated voltage of the cable for a given application shall be suitable for the operating conditions in the system in which the cable is used. To facilitate the selection of the cable, systems are divided into three categories:

- category A: this category comprises those systems in which any phase conductor that comes in contact with earth or an earth conductor is disconnected from the system within 1 min;
- category B: this category comprises those systems which, under fault conditions, are operated for a short time with one phase earthed. This period, according to IEC 60183, should not exceed 1 h. For cables covered by this standard, a longer period, not exceeding 8 h on any occasion, can be tolerated. The total duration of earth faults in any year should not exceed 125 h;
- category C: this category comprises all systems which do not fall into category A or B.

NOTE 2 It should be realized that in a system where an earth fault is not automatically and promptly isolated, the extra stresses on the insulation of cables during the earth fault reduce the life of the cables to a certain degree. If the system is expected to be operated fairly often with a permanent earth fault, it may be advisable to classify the system in category C.

The values of U_0 recommended for cables to be used in three-phase systems are listed in Table 1.

Table 1 – Recommended rated voltages U_0

Highest system voltage (U_m) kV	Rated voltage (U_0) kV	
	Categories A and B	Category C
7,2	3,6	6,0
12,0	6,0	8,7
17,5	8,7	12,0
24,0	12,0	18,0
36,0	18,0	–

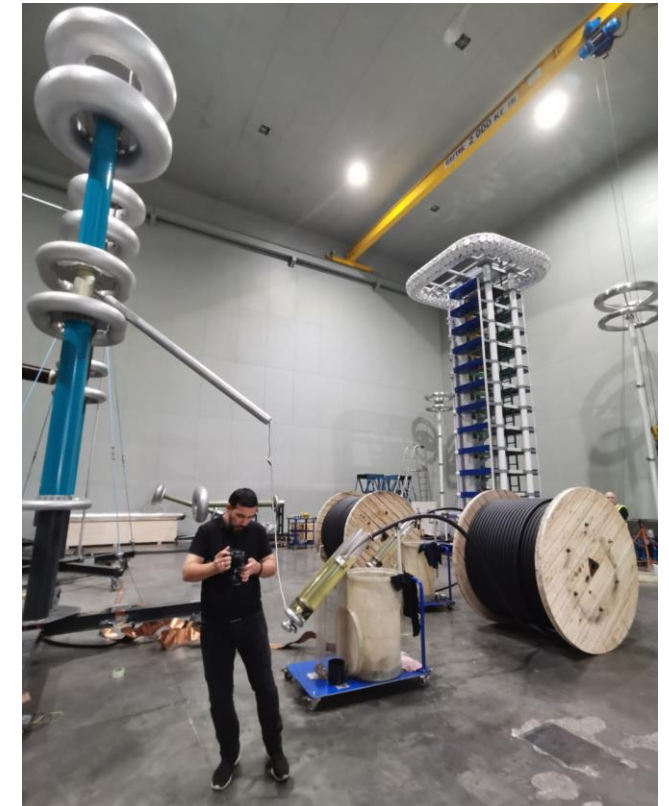


Сравнение методов контроля технического состояния КЛ с изоляцией СПЭ в эксплуатации

№п/п	Метод контроля	СТО 34.01-23.1-001-2017 ПАО «Россети» (Объем и нормы испытаний)	Стандарты организаций (Россети Ленэнерго, Россети Сибирь и др.)
1.	Визуальный	Не регламентирован	Да, для доступных участков КЛ
2.	Тепловизионный	Не реже 1 раза в 3 года (при возможности проведения под нагрузкой), п. 35.16	Да, по нормам РД
3.	Измерение сопротивления изоляции	Не требуется, но допускается, п. 35.1	Нормирован коэффициент абсорбции
4.	Измерение рабочей емкости кабеля	Да, по нормам РД	Да, по нормам РД
5.	Измерение сопротивления с проверкой целостности жил и фазировка	Да, по нормам РД	Да, на основе рефлектографии с определением фактической длины
6.	Методы испытания напряжением промышленной и сверхнизкой частоты	Да, с расширенным диапазоном времени и приложенного напряжения для напряжения СНЧ относительно ГОСТ 34834, п.10.6 (ранее ГОСТ Р 55025-2012)	Да, для СТО после 2013 г. в соответствии с ГОСТ 34834, п.10.6 (ранее ГОСТ Р 55025-2012), ранее - аналогично СТО ПАО «Россети»
7.	Метод испытания повышенным выпрямленным напряжением	Не допускается, ввиду непригодности для полимерной изоляции (опасность каскадного повреждения КЛ из-за накопленных при испытании объемных зарядов).	
8.	Метод измерения параметров и локализация ЧР	Предусмотрен только для кабельных муфт линий напряжением 110 кВ и выше, п. 35.15 (критериев оценки результатов нет)	Да, с критериями оценки результатов
9.	Метод интегральной оценки увлажнения изоляции (измерение tgD)	Нет, косвенно можно отнести к комплексному диагностическому обследованию, , п. 35.18 (требований и критериев оценки нет)	

Управление техническим состоянием КЛ-35 кВ - комплексная задача, требующая внимания на всех стадиях жизненного цикла линии:

1. **На этапе проектирования:** корректный выбор параметров КЛ с учетом условий прокладки и эксплуатации, сечения и способа заземления экранов (при пофазной прокладке в плоскости), выбор режима нейтрали с учетом селективной 3033 с действием на отключение.
2. **На этапе строительства:** входной контроль, обеспечение высокого качества прокладки линии и монтажа муфт, диагностирование «нулевого» состояния КЛ.
3. **На этапе эксплуатации** - регулярный контроль ТС (щадящие испытания, измерения, диагностирование, отслеживание трендов) и реализация восстановительных мероприятий, детальное расследование аварийных событий с мерами их предупреждения.



Нормативные требования частично реализованы в СТО (ПАО «Россети Ленэнерго» 2012, ПАО «ЛУКОЙЛ» 2018) и местных инструкциях и регламентах в форме
технологии выбора, строительства и эксплуатации КЛ с полимерной изоляцией

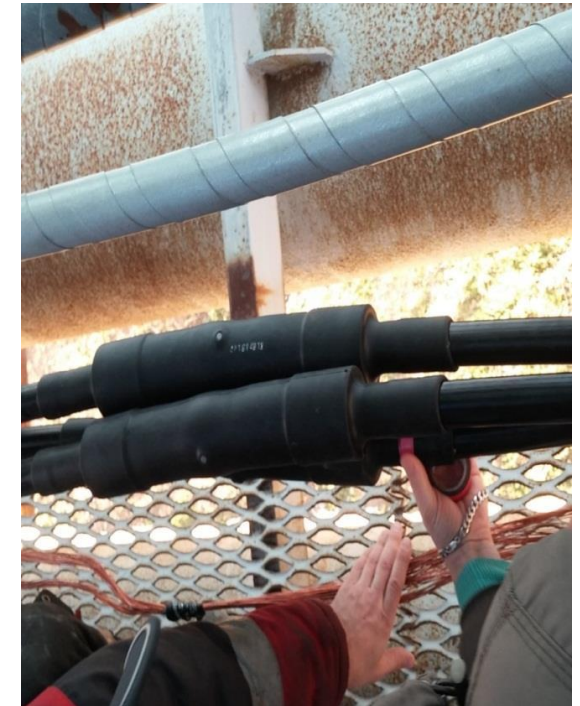
Комплексное диагностирование КЛ-35 кВ (пример)

В кабельной сети эксплуатируются 33 КЛ-35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, общая протяжённость кабельных линий составляет более 100 км.

В 2021 г. было проведено 18 исследований кабельных линий напряжением 35 кВ.

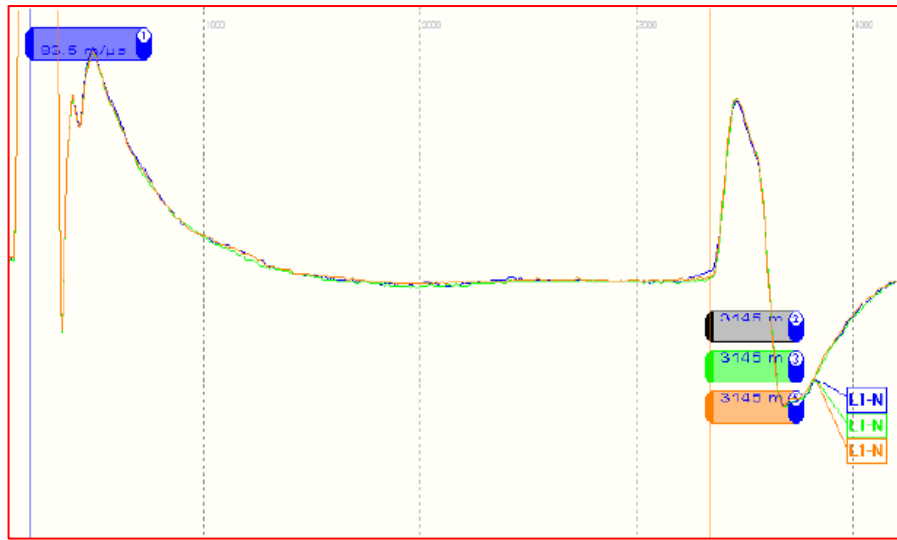
Исследование проводили с применением системы испытания и диагностики производства BAUR, Австрия, в следующем объеме:

- визуальный осмотр доступных участков фаз кабельной линии;
- проверку маркировки фаз кабельной линии;
- определение длин фаз кабельной линии;
- измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции каждой фазы;
- регистрацию частичных разрядов в изоляции каждой фазы с определением места их возникновения;
- измерение сопротивления изоляции фаз кабельной линии.

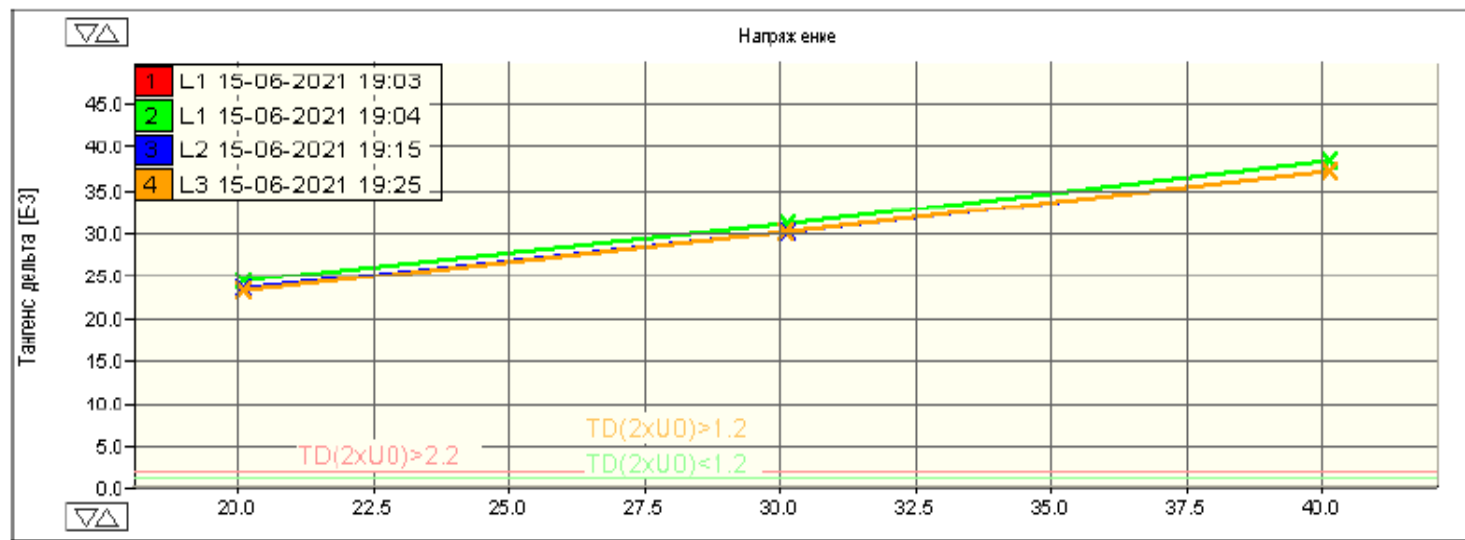


Кабельная линия 35 кВ исп. №87/07 (1)

- Выполнена кабелями марок АПВВнг-А и АПВКсВнг сечениями 3(1x300/50), изготовитель ООО «Камский кабель».
- С одной стороны установлены концевые муфты марки QTIII 94-EP 638-2.
- С другой стороны установлены кабельные муфты для сборных шин MV-CONNEX. На каждой фазе установлено по 5 соединительных переходных муфт марки QSIII 94-AC 638-1(5467A).
- Введена в эксплуатацию в 2014 году. Способ прокладки кабеля - на эстакаде («треугольник»).



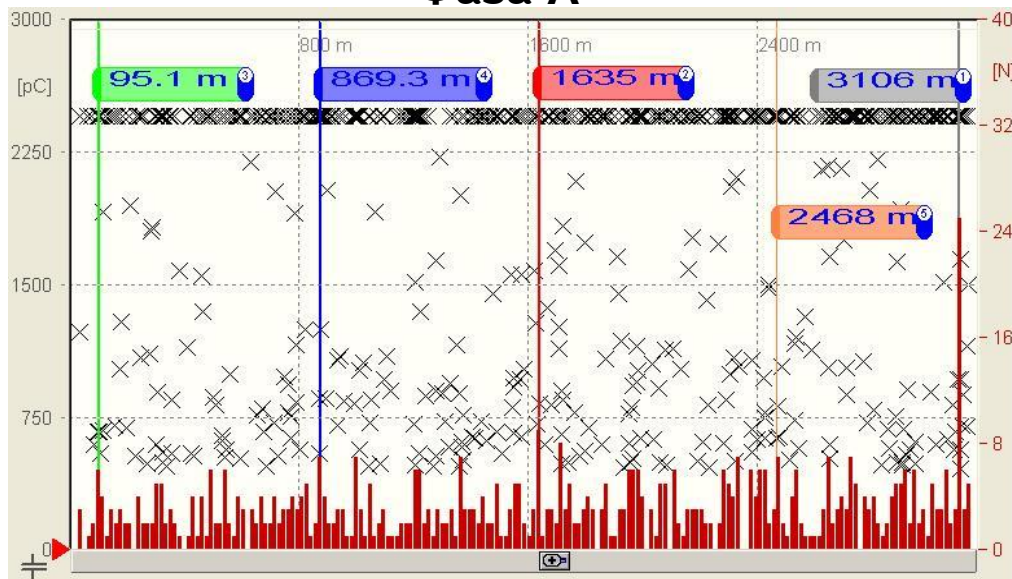
Рефлектограмма



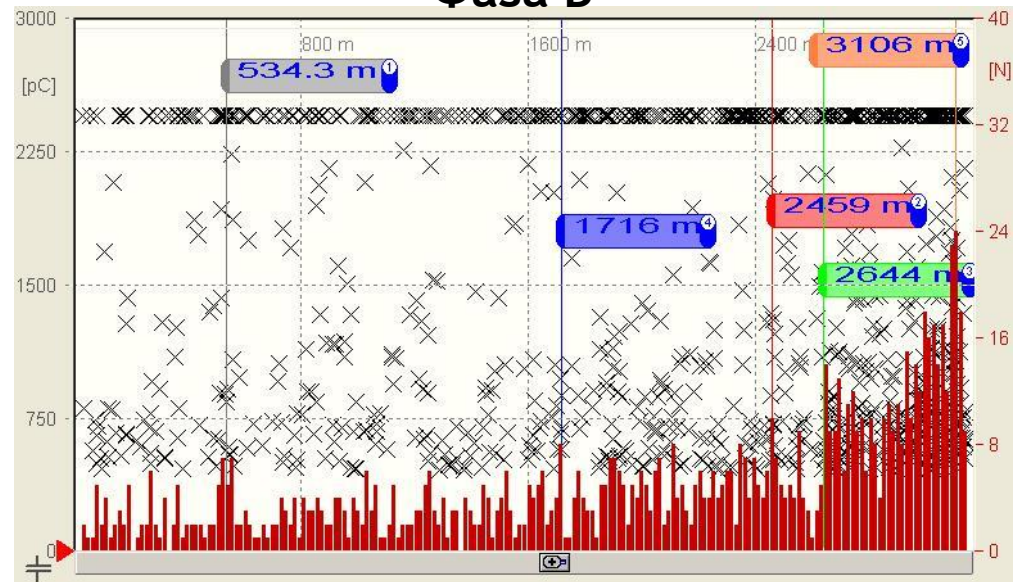
Тангенс угла диэлектрических потерь фаз

Кабельная линия 35 кВ исп. №87/07 (2)

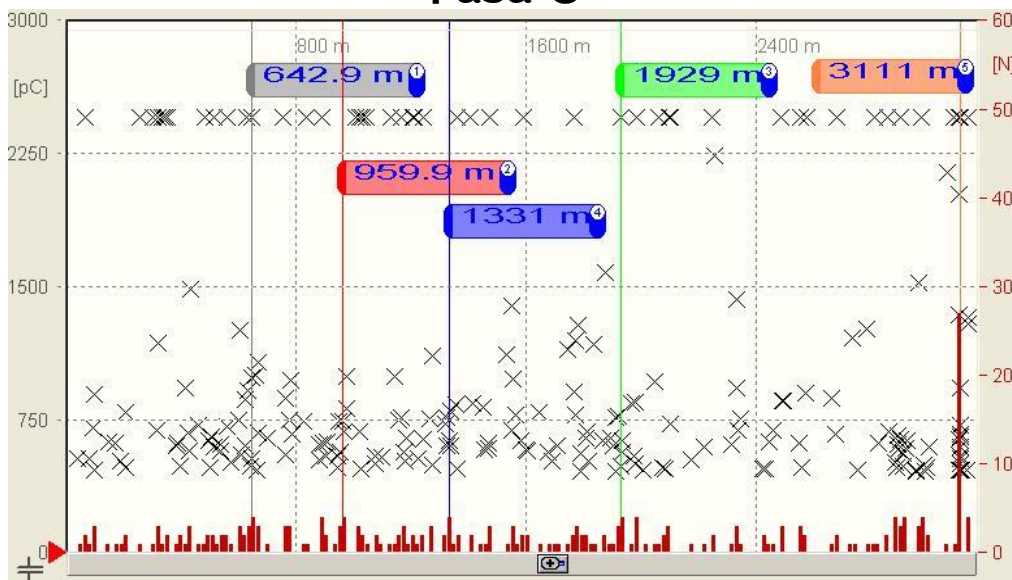
Фаза А



Фаза В



Фаза С



Согласно результатам комплексного обследования (критичны оказались ЧР)

- фаза А КЛ - требует проведения восстановительных работ
- фаза В КЛ - требует проведения восстановительных работ
- фаза С КЛ - требует проведения восстановительных работ

Разница в уровнях ЧР

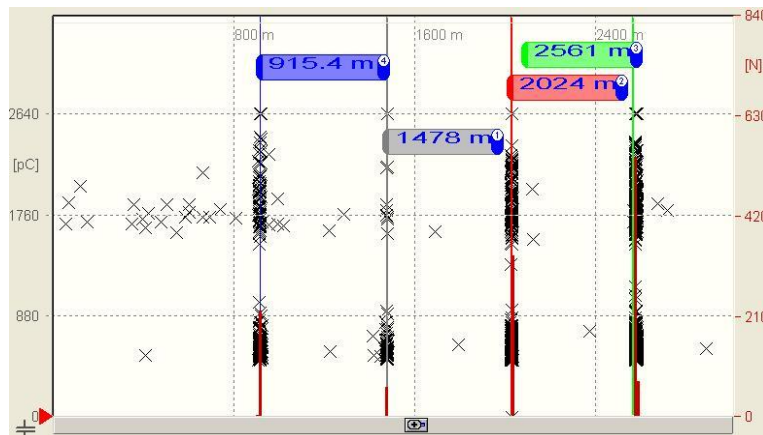
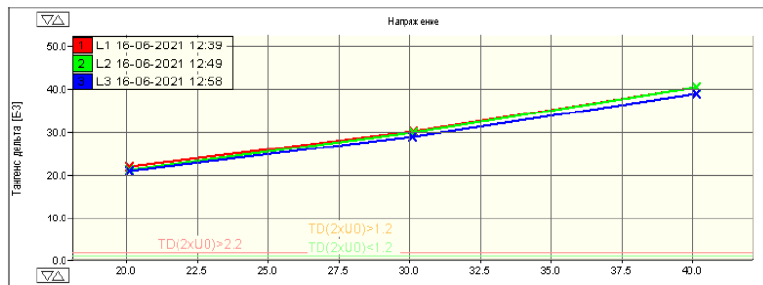


Уровень ЧР, измеряемый на строительных длинах новых кабелей – не более 5,0-10,0 пКл (экранированная лаборатория - «клетка Фарадея»)



Уровень ЧР, измеряемый в эксплуатации от сотен до тысяч пКл, калибровка чаще всего на уровне 500 пКл (помехи)

Проблематика оценки результатов обследования



Получаемые при диагностировании результаты могут существенно отличаться для разных КЛ в зависимости от ряда условий:

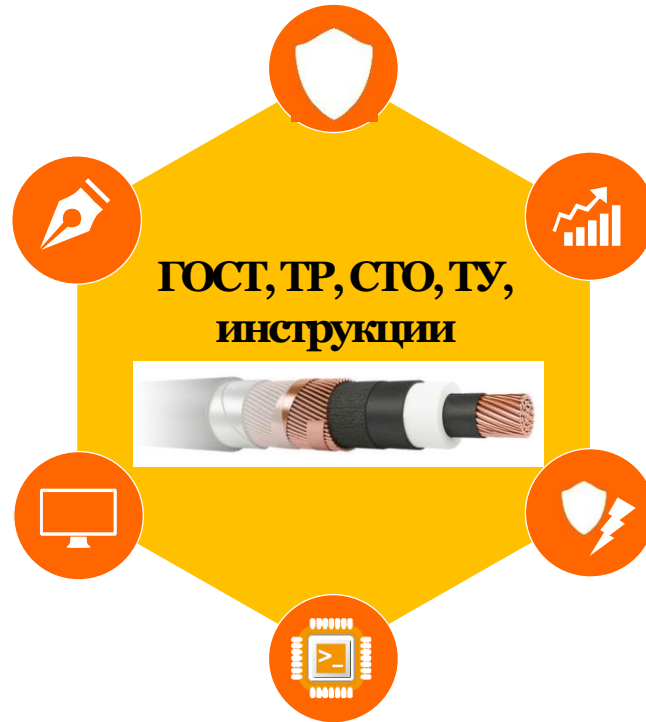
1. применяемый метод регистрации ЧР (метод затухающих колебаний или метод на основе приложения синусоидального напряжения СНЧ),
2. ток нагрузки относительно номинального значения и график изменения нагрузки по фидерам и по участку сети в целом,
3. способ прокладки (в траншее, по эстакаде, в ряд, треугольником),
4. конструкция КЛ и арматуры (кабели трехжильные, одножильные, с круглыми и секторными жилами, бронированные и без брони, муфты с термоусадкой и холодной усадки и пр.),
5. срок эксплуатации под напряжением, число и параметры КЗ, при которых аварийный ток протекал по линии,
6. ретроспектива аварийных отказов и ремонтов, перегрузок
7. схема транспозиции и заземления экранов и др.

Принципы управления техническим состоянием КЛ СПЭ

Регулярный контроль технического состояния : щадящие
испытания , диагностирование , ТВО/термоиндикаторы

Обеспечение должного качества
прокладки КЛ и монтажа муфт,
Создание диагностического
паспорта КЛ «нуля»

Правильный выбор Сж, Сэ ,
способа заземления экрана



Расследование аварий, вскрытие
поврежденных участков,
сопоставление с целыми участками

Защита от внутренних (для ВКЛ - также и
грозовых) перенапряжений: режим
нейтрали , ОПН, РС-цепи, комбинации

Организация селективной ЗОЗЗ
с действием на отключение

4. Критерии определения остаточного ресурса КЛ

4.1. Ключевой фактор - нагрев изоляции

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 64, № 2 (2021), с. 121–129

Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 64, No 2 (2021), pp. 121–129

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-121-129>

УДК 621.316

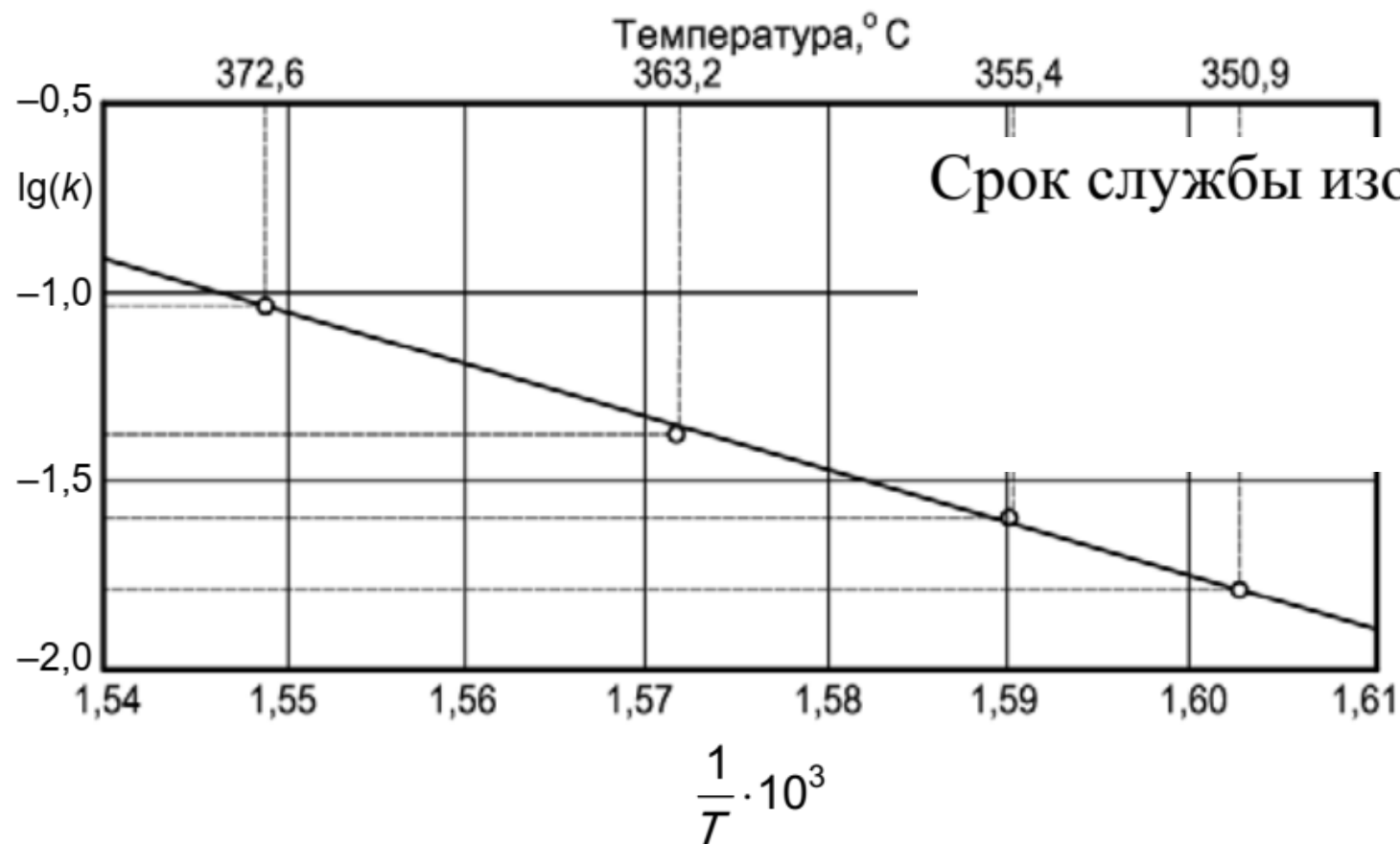
Старение изоляции из сшитого полиэтилена кабельных линий

И. В. Олексюк¹⁾

¹⁾УП «БЕЛКОММУНПРОЕКТ» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Оценка скорости срабатывания ресурса



$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln(c_1)}{-K_t(T) \cdot 8760 \cdot 3600}.$$

График Аррениуса для процесса термической деструкции сшитого полиэтилена

4.2. Методики оценки срабатывания ресурса КЛ

Актуально

РЕСУРС КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Выбор методики определения сработанного ресурса современных кабельных линий

Александр НАЗАРЫЧЕВ, ректор ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Минэнерго России, д.т.н., профессор, Дмитрий АНДРЕЕВ, главный специалист ОАО «Зарубежэнергопроект», к.т.н.

Высоковольтные кабельные линии (КЛ) при эксплуатации подвергаются воздействию перенапряжений, повышенных температур, влажности, механических нагрузок и т.д. Эти воздействия приводят к старению электрической изоляции, к пробоям и выходу из строя КЛ. Поэтому с учётом всё возрастающих требований к бесперебойному электроснабжению потребителей актуальной задачей является выбор расчётных методов достоверного определения сработанного ресурса КЛ с учётом действия эксплуатационных факторов.

Известным подходом при оценке ресурса является установление взаимосвязи между величиной среднего ресурса и воздействующими на изоляцию КЛ эксплуатационными факторами. Эта взаимосвязь рассмотрена на примере модели, предложенной в [1]. Определение фактического сработанного ресурса R в зависимости от изменения величины воздействующих факторов X_i выполняется по выражению:

$$R = R_0 e^{\sum_{i=1}^N \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}} \quad (1)$$

где $i = 1...N$ — количество эксплуатационных факторов, оказывающих воздействие на сработку ресурса, ΔX_i — отклонение i -го фактора от нормативного значения X_{0i} .

В настоящее время широкое применение получили силовые кабели с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Так как КЛ служат на объектах энергетики

для передачи электроэнергии от источника питания к потребителю, то целесообразно выбрать временные единицы измерения наработки.

Силовые кабели подвергаются воздействию различных групп эксплуатационных факторов: химических, электрических, механических, температурных.

Оценка влияния химических факторов на жилы кабеля и изоляцию может быть произведена, как это показано в [1].

Действие электрических факторов связано с воздействием напряжённости электрического поля, которое наблюдается в том числе при коммутационных и грозовых перенапряжениях. Однако кабели защищаются обычно ограничителями перенапряжений. Также токи короткого замыкания создают электродинамические усилия, что может вызвать механические повреждения изоляции кабеля. При выборе кабелей обычно производится проверка по электродинамической стойкости, по результатам которой выбирается тип кабеля и способ его прокладки, который выдержит ударный ток короткого замыкания на данном участке сети. В нормативно-технической документации не оговариваются сроки службы кабелей при возникновении в них известных по величине механических напряжений. Кроме того, силовые КЛ, особенно при прокладке в земле, представляют собой достаточно надёжную конструкцию против воздействия таких динамических перегрузок [2]. Поэтому влияние перенапряжений и электродинамических воздействий в дальнейшем учитывать не будем.

Согласно [3, 4, 5] ресурс изоляции силовых

КЛ определяется тепловыми режимами их работы, которые, в свою очередь, зависят от типа кабеля, условий прокладки, температуры окружающей среды, а также от значения протекающего электрического тока. В [5] утверждается, что при нагреве жил кабеля до температуры 350°C для кабелей небронированных с бумажной пропитанной или пластмассовой изоляцией и до 400°C для бронированных кабелей с бумажной изоляцией не происходит разрыва оболочки и повреждения концевых заделок, а также возгорания кабелей. Кроме того, в [5] рекомендуется выполнять расчёт температуры кабелей после каждого воздействия тока короткого замыкания и определять их пригодность к дальнейшей эксплуатации при температуре нагрева жил кабелей:

- с пропитанной бумажной изоляцией свыше 200°C, но не более 300°C;
- с полимерной изоляцией свыше 160°C, но не более 250°C.

Допускается временное сохранение в эксплуатации этих кабелей до их замены в течение 1 года. Такие кабели после воздействия тока короткого замыкания должны быть осмотрены, концевые заделки при необходимости отремонтированы, а также должны быть проведены испытания повышенным напряжением. При температуре нагрева жил кабелей выше указанных значений кабели считаются непригодными к дальнейшей эксплуатации и подлежат немедленной замене.

Анализируя каталоги силовых кабелей с ПВХ-изоляцией и изоляцией из СПЭ различных заводов-изготовителей, были установлены следующие предельно допустимые температуры нагрева: 160°C — для кабелей с ПВХ-изоляцией сечением меньшим или равным 300 мм²; 140°C — для кабелей с ПВХ-изоляцией сечением более 300 мм²; 250°C — для кабелей с изоляцией из СПЭ.

Таким образом, при воздействии токов короткого замыкания определённой величины и продолжительности остаточный срок службы кабелей равен 1 году при любых дальнейших режимах работы, при которых температура нагрева жил превышает следующие значения для:

- кабелей с ПВХ-изоляцией сечением меньшим или равным 300 мм² — до $\vartheta_{дон} = 160^\circ\text{C}$;
- кабелей с ПВХ-изоляцией сечением более 300 мм² — до $\vartheta_{дон} = 140^\circ\text{C}$;
- кабелей с изоляцией из СПЭ любого сечения — до $\vartheta_{дон} = 250^\circ\text{C}$;
- кабелей с пропитанной бумажной изоляцией — до $\vartheta_{дон} = 200\text{—}300^\circ\text{C}$.

Очевидно, что все ограничения по срокам службы КЛ связаны с процессами нагрева кабелей. Никаких ограничений на длительность коротких замыканий в [5] не накладывается. Однако учитывая,

что, например, для кабелей в системе собственных нужд электростанций максимальная расчётная длительность короткого замыкания составляет 4 с, в [5] приведена номограмма для определения конечной температуры кабеля при коротком замыкании. Так как ограничения связаны лишь с температурами нагрева кабелей, то, очевидно, их можно использовать при любых режимах работы кабеля, в которых происходит нагрев до указанных выше температур.

В [6, 7] предлагается определять фактический срок службы кабелей в зависимости от температуры по $\Delta\vartheta$ -градусному правилу и закону Вант-Гоффа — Аррениуса. Согласно [7] нормативный ресурс силовых кабелей составляет $R_0 = 25$ лет. При этом по данным каталогов принимается:

- для кабелей с ПВХ-изоляцией $\vartheta_0 = 70^\circ\text{C}$;
- для кабелей с изоляцией из СПЭ $\vartheta_0 = 90^\circ\text{C}$;
- для кабелей с пропитанной бумажной изоляцией $\vartheta_0 = 60$ или 65°C [7].

Значения ϑ_0 для отдельных типов кабелей могут несколько отличаться от приведённых и должны указываться производителями в нормативной документации или в технических условиях на эксплуатацию таких КЛ.

По принятой сегодня терминологии остаточный срок службы соответствует нормативному остаточному ресурсу $R_{ост}$. Так как в [5] не указано, при каких нагрузках кабель после короткого замыкания и нагрева до оговорённых выше температур проработает ещё 1 год до замены, то примем этот режим, соответствующий нормативному режиму работы.

Учитывая всё вышесказанное, можно сделать вывод о том, что силовой кабель за время работы в ненормативных условиях R_1 , которые привели к его нагреву до указанных выше температур $\vartheta_{дон}$, срабатывает фактический ресурс в объёме $R_0 - 1$ год, который в именованных единицах можно записать следующим образом:

$$\text{или} \quad R_0 - 1 = R_1 e^{\frac{\vartheta_{дон} - \vartheta_0}{\Delta\vartheta_1}} \quad (2)$$

$$R_0 - 1 = R_1 e^{\frac{1/\vartheta_{дон} - 1/\vartheta_0}{1/\Delta\vartheta_2}} \quad (3)$$

Выразим из формул (2) и (3) величины $\Delta\vartheta$ и получим соответственно:

$$\Delta\vartheta_1 = \frac{\vartheta_{дон} - \vartheta_0}{\ln\left(\frac{R_0 - 1}{R_1}\right)} \quad (4), \quad \Delta\vartheta_2 = \frac{\ln\left(\frac{R_0 - 1}{R_1}\right)}{1/\vartheta_{дон} - 1/\vartheta_0} \quad (5).$$

Приняв в формулах (4) и (5) $R_0 = 25$ лет, $\vartheta_0 = (60; 65; 70; 90)^\circ\text{C}$ и $\vartheta_{дон} = (140; 160; 200; 250; 300)^\circ\text{C}$ в зависимости от типа кабеля, можно рассчитать со-

Актуально

РЕСУРС КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

4.3. Методики оценки срабатывания ресурса КЛ

Актуально

РЕСУРС КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

ответствующие величины $\Delta\vartheta$. При этом важно отметить, что величина R_i должна быть такова, чтобы за это время кабель данного типа и сечения (мм²) нагрелся от температуры ϑ_0 до $\vartheta_{\text{доп}}$. Уравнение нагрева кабеля до температуры $\vartheta_{\text{уст}}$ выражается зависимостью [9]:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{R_i}{T}} \right) \quad (6),$$

где $\vartheta_{\text{уст}}$ — установившаяся температура; R_i — время нагрева; T — постоянная времени при известных условиях прокладки кабеля.

С учётом выражения (6) кривая нагрева кабеля от начальной температуры ϑ_0 до температуры $\vartheta = \vartheta_{\text{доп}}$ описывается формулой:

$$\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) \left(1 - e^{-\frac{R_i}{T}} \right) \quad (7).$$

Температура $\vartheta_{\text{доп}}$ является абстрактной границей сработки кабелем фактического ресурса, равного ($R_0 - 1$), за время R_i нагрева до этой температуры. Если кабель за время R_i не нагрелся до температуры $\vartheta_{\text{доп}}$, то фактический сработанный ресурс не определён, а если нагрелся, то определён и равен ($R_0 - 1$) [5]. При применении экспоненциального закона процесс можно считать установившимся уже после истечения времени, равного $R_i = 4T$, при этом погрешность при определении температуры составит 1%. Таким образом, величина $R_i = 4T$ характеризует максимальное время, за которое кабель нагрелся до температуры $\vartheta_{\text{доп}}$, определённой с абсолютной погрешностью ~0,01 $\vartheta_{\text{доп}}$. Это возможно при нормальных и перегрузочных режимах работы кабеля, когда релейная защита не срабатывает и при данном токе кабель продолжает постепенно нагреваться до определённой установившейся температуры. С учётом этого выражения (4) и (5) примут соответственно вид:

$$\Delta\vartheta_1 = \frac{\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0}{\ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)} \quad (8), \quad \Delta\vartheta_2 = \frac{\ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)}{1/\vartheta_{\text{доп}} - 1/\vartheta_0} \quad (9).$$

Из формул (8) и (9) очевидно, что величины $\Delta\vartheta_1$ и $\Delta\vartheta_2$ зависят лишь от типа кабеля и условий его прокладки, так как параметры ϑ_0 , $\vartheta_{\text{доп}}$, R_0 зависят от типа кабеля, а величина T — от типа и условий прокладки. Подставим (8) и (9) соответственно в (2) и (3), с учётом (1) получим в именованных единицах значения фактического сработанного ресурса КЛ:

$$R = R_0 e^{\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\Delta\vartheta_1} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)} \quad (10),$$

$$R = R_0 e^{\frac{1/\vartheta - 1/\vartheta_0}{1/\vartheta_{\text{доп}} - 1/\vartheta_0} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)} \quad (11).$$

При использовании выражений (10) и (11) необходимо иметь в виду, что в (10) температура может измеряться как по Цельсию, так и по Кельвину. В выражении (11) — только по шкале Кельвина. Фактическую установившуюся температуру кабеля можно определить по хорошо известной методике, изложенной, например, в [8]. При прокладке в воздухе величина постоянной времени $T = T_1$ может быть вычислена так [9]:

$$T_1 = (S_1 + S_2) [c_{\text{ж}} + 0,5(c_{\text{из}} + c_{\text{ош}})] \quad (12),$$

где S_1 — тепловое сопротивление изоляции кабеля; S_2 — тепловое сопротивление поверхности кабеля; $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{из}}$, $c_{\text{ош}}$ — удельные теплоёмкости жилы, изоляции и оболочки кабеля.

При прокладке в земле постоянная времени $T = T_2$ может быть вычислена по выражению [9]:

$$T_2 = (S_1 + S_2 + S_3) [c_{\text{ж}} + 0,5(c_{\text{из}} + c_{\text{ош}} + c_{\text{почв}})] \quad (13),$$

где S_3 — тепловое сопротивление защитных покрытий кабелей, прокладываемых в земле; S_3 — тепловое сопротивление почвы; $c_{\text{почв}}$ — удельная теплоёмкость защитных покрытий кабелей.

В исследованиях [8, 9] для различных кабелей приводятся все необходимые расчётные формулы для определения величин S_1 , S_2 , S_3 , а также справочные данные по значениям величин $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{из}}$, $c_{\text{ош}}$, $c_{\text{почв}}$. При коротких замыканиях время нагрева кабеля ограничивается действием релейной защиты. Например, для кабелей, эксплуатируемых в системе собственных нужд электростанций, расчёт на невозможность производства с учётом времени действия резервной релейной защиты, равного 4 с. В этом случае для определения конечной температуры жилы кабеля ϑ_i можно воспользоваться следующей формулой [5]:

$$\vartheta_i = \vartheta_0 e^{a(e^k - 1)} \quad (14),$$

где ϑ_0 — начальная температура жилы кабеля; $a = 228^\circ\text{C}$ — величина, обратная температурному коэффициенту электрического сопротивления при 0°C ; k определяется по выражению

$$k = b (I^2 R_i) / S^2 \quad (15),$$

где $b = 45,65 \text{ мм}^2/(\text{KA}^2\cdot\text{с})$ для алюминия; $b = 19,58 \text{ мм}^2/(\text{KA}^2\cdot\text{с})$ для меди; S — поперечное сечение кабеля (мм²); I — действующее значение тока; R_i — длительность воздействия тока I .

Величина k также может быть определена из выражения (14) при $\vartheta_i = \vartheta_0$ и $\vartheta_k = \vartheta_{\text{доп}}$:

$$\vartheta_{\text{доп}} = \vartheta_0 e^{a(e^k - 1)} \Rightarrow e^k = (\vartheta_{\text{доп}} + a) / (\vartheta_0 + a), \quad k = \ln [(\vartheta_{\text{доп}} + a) / (\vartheta_0 + a)] \quad (16).$$

Подставляя $a = 228^\circ\text{C}$, $\vartheta_0 = \{60; 65; 70; 90\}^\circ\text{C}$ и $\vartheta_{\text{доп}} = \{140; 160; 200; 250; 300\}^\circ\text{C}$ для различных типов кабе-

РК
РУСКАБЕЛЬ

Актуально

РЕСУРС КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

лей, можно получить значения коэффициента k . Приравняв формулы (15) и (16), найдём величину R_i :

$$b (I^2 R_i) / S^2 = \ln [(\vartheta_{\text{доп}} + a) / (\vartheta_0 + a)], \quad R_i = (1/I^2) (S^2/b) \ln [(\vartheta_{\text{доп}} + a) / (\vartheta_0 + a)] \quad (17).$$

Найдём значения $(\vartheta_k - \vartheta_0)$ и $(1/\vartheta_k - 1/\vartheta_0)$ по выражениям:

$$\vartheta_k - \vartheta_0 = \vartheta_0 e^k - \vartheta_0 + a(e^k - 1) = (\vartheta_{\text{доп}} + a)(e^k - 1), \quad (18),$$

$$1/\vartheta_k - 1/\vartheta_0 = \frac{1}{\vartheta_0 e^k + a(e^k - 1)} - \frac{1}{\vartheta_0} = \frac{\vartheta_0 - \vartheta_0 e^k - a(e^k - 1)}{\vartheta_0^2 e^k + \vartheta_0 a(e^k - 1)} = \frac{(1 - e^k)(\vartheta_0 + a)}{\vartheta_0^2 e^k + \vartheta_0 a(e^k - 1)} \quad (19).$$

При $\vartheta_0 = \vartheta_0$ и $\vartheta_k = \vartheta_{\text{доп}}$ после подстановки формул (18) и (19) соответственно в (4) и (5) получим:

$$\Delta\vartheta_1 = \frac{(\vartheta_0 + a)(e^k - 1)}{\ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right)} \quad (20), \quad \Delta\vartheta_2 = \frac{\ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right)}{\frac{(1 - e^k)(\vartheta_0 + a)}{\vartheta_0^2 e^k + \vartheta_0 a(e^k - 1)}} \quad (21),$$

где коэффициент k вычисляется по выражению (15).

Выполняя математические преобразования, описанные в [1], получим итоговые выражения для определения фактического сработанного и остаточного ресурса КЛ для $\Delta\vartheta$ -градусных правил:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\Delta\vartheta_1} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)} dr - R_j \right) \quad (22),$$

$$R_{\text{ост}} = R_0 - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\Delta\vartheta_2} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)} dr - R_j \right) \quad (23),$$

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{\vartheta_i - \vartheta_0 + a \left(\frac{\vartheta_{\text{доп}} + a}{\vartheta_0 + a} - 1 \right) \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right)} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right) \frac{1}{\vartheta_0^2 e^k + \vartheta_0 a(e^k - 1)} dr - R_j \right) \quad (24),$$

$$R_{\text{ост}} = R_0 - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{\vartheta_i - \vartheta_0 + a \left(\frac{\vartheta_{\text{доп}} + a}{\vartheta_0 + a} - 1 \right) \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right)} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right) \frac{1}{\vartheta_0^2 e^k + \vartheta_0 a(e^k - 1)} dr - R_j \right) \quad (25).$$

Для закона Вант Гоффа — Аррениуса эти формулы для определения фактического сработанного и остаточного ресурса КЛ запишутся в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{1/\vartheta - 1/\vartheta_0}{1/\vartheta_{\text{доп}} - 1/\vartheta_0} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)} dr - R_j \right) \quad (26),$$

$$R_{\text{ост}} = R_0 - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{1/\vartheta - 1/\vartheta_0}{1/\vartheta_{\text{доп}} - 1/\vartheta_0} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{4T} \right)} dr - R_j \right) \quad (27),$$

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{\vartheta_i - \vartheta_0 + a \left(\frac{\vartheta_{\text{доп}} + a}{\vartheta_0 + a} - 1 \right) \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right)} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right) \frac{1}{\vartheta_0^2 e^k + \vartheta_0 a(e^k - 1)} dr - R_j \right) \quad (28),$$

$$R_{\text{ост}} = R_0 - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_i} e^{\frac{\vartheta_i - \vartheta_0 + a \left(\frac{\vartheta_{\text{доп}} + a}{\vartheta_0 + a} - 1 \right) \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right)} \ln \left(\frac{R_0 - 1}{R_i} \right) \frac{1}{\vartheta_0^2 e^k + \vartheta_0 a(e^k - 1)} dr - R_j \right) \quad (29).$$

Рассмотрим примеры по определению фактического сработанного и остаточного ресурса силовых кабелей.

Пример 1. Одножильный алюминиевый кабель с ПВХ-изоляцией сечением 1х120 мм², работающий в стационарном режиме на воздухе. Согласно [9] тепловое сопротивление изоляции такого кабеля определяется по выражению: $S_1 = 0,037 \sigma \lg(R_k/r_k) = 0,037 \cdot 650 \lg(10/6,18) = 5,027^\circ\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$ (30),

где σ — удельное тепловое сопротивление изоляции кабеля (согласно [9] принимается равным 600—700 $^\circ\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$, в нашем случае — 650 $^\circ\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$); R_k — внешний радиус кабеля (для данного кабеля принимается равным $\approx 20/2 = 10$ мм); r_k — радиус жилы кабеля (принимается равным $\sqrt{120/\pi} = 6,18$ мм).

Тепловое сопротивление поверхности кабеля при прокладке в воздухе определяется по выражению [9]:

$$S_2 = \sigma_s / \pi D_k = 1000/20\pi = 15,915^\circ\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт} \quad (31),$$

где σ_s — удельное тепловое сопротивление поверхности данного кабеля при прокладке в воздухе (согласно [9] принимается равным 800—1200 $^\circ\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$, возьмём 1000 $^\circ\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$); D_k — внешний диаметр кабеля (принимается равным ≈ 20 мм).

По формуле (12) определим постоянную времени нагрева кабеля: $T_1 = (S_1 + S_2) [c_{\text{ж}} + 0,5(c_{\text{из}} + c_{\text{ош}})] = (5,027 + 15,915) [8,89 + 0,5(1,3 + 1,3)] = 240,624$ с, где $c_{\text{ж}} = 8,89$ г/см³; $c_{\text{из}} = c_{\text{ош}} = 1,3$ г/см³ [9].

Допустим, нормативный срок службы данного кабеля составляет $R_0 = 20$ лет. Для кабелей с ПВХ-изоляцией

4.4. Методики оценки срабатывания ресурса КЛ

Актуально

РЕСУРС КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

$\theta_0 = 70^\circ\text{C}$. Предположим, что данный кабель отработал свой нормативный срок службы, однако 5 лет он эксплуатировался с температурой 50°C , а остальные 15 — с температурой 68°C . Рассчитаем по формулам (22) и (26) фактический сработанный ресурс данного кабеля:

$$R = 20 + 5 \left[e^{\frac{50-70}{160-70} \ln \left(\frac{20-1}{4 \cdot \frac{240,624}{8760 \cdot 3600}} \right)} - 1 \right] + 15 \left[e^{\frac{68-70}{160-70} \ln \left(\frac{20-1}{4 \cdot \frac{240,624}{8760 \cdot 3600}} \right)} - 1 \right] = 11,409 \text{ года};$$

$$R = 20 + 5 \left[e^{\frac{1/50 - 1/70}{1/160 - 1/70} \ln \left(\frac{20-1}{4 \cdot \frac{240,624}{8760 \cdot 3600}} \right)} - 1 \right] + 15 \left[e^{\frac{1/68 - 1/70}{1/160 - 1/70} \ln \left(\frac{20-1}{4 \cdot \frac{240,624}{8760 \cdot 3600}} \right)} - 1 \right] = 7,467 \text{ года}.$$

Результаты расчётов по формулам отличаются на $11,4 - 7,5 = 3,9$ года. Очевидно, что формула с использованием $\Delta\theta$ -градусных правил является более строгой. Поэтому целесообразно пользоваться именно ею, чтобы избежать аварийных ситуаций с наибольшей вероятностью.

Если далее кабели будут эксплуатироваться при нормативных условиях, то остаточный ресурс определится как $R_{0, \text{ост}} = 20 - 11,4 = 8,6$ года или $R_{0, \text{ост}} = 20 - 7,5 = 12,5$ года. При необходимости с помощью формул (23) или (27) можно скорректировать эти значения с учётом дальнейших условий эксплуатации.

Пример 2. Воспользуемся данными и результатами примера 1 и предположим, что данная КЛ в процессе своей эксплуатации подвергается воздействию тока короткого замыкания величиной 5 кА в течение 2 с. Начальную температуру при коротком замыкании примем равной 55°C (короткое замыкание произошло в пределах 5 лет, при которых температура кабеля была равна 55°C). С помощью формул (24) и (28) определим фактический сработанный ресурс кабеля за 2 с:

$$R = 2 + 2 \left[e^{\frac{55 \cdot \frac{160+228}{70+228} + 228 \left(\frac{160+228}{70+228} - 1 \right) - 70}{(160-70)} \ln \left(\frac{20 \cdot 8760 \cdot 3600 - 1}{5^2 \cdot 45,65 \cdot \frac{160+228}{70+228}} \right)} - 1 \right] = 6,056 \cdot 10^6 \text{ с, или } 0,2 \text{ года};$$

$$R = 2 + 2 \left[e^{\frac{1}{\frac{55 \cdot \frac{160+228}{70+228} + 228 \left(\frac{160+228}{70+228} - 1 \right) - 70}{(70-160)} \ln \left(\frac{20 \cdot 8760 \cdot 3600 - 1}{5^2 \cdot 45,65 \cdot \frac{160+228}{70+228}} \right)} - 1} \right] = 4,823 \cdot 10^7 \text{ с, или } 1,5 \text{ года}.$$

Результаты расчётов отличаются на $1,5 - 0,2 = 1,3$ года. Очевидно, что формула с использованием закона Вант-Гоффа — Аррениуса является более строгой. Поэтому целесообразнее пользоваться выражением (28) для большей надёжности результатов расчёта.

Таким образом, если КЛ эксплуатировалась так, как показано в примере 1, и при этом подвергалась воздействию тока короткого замыкания величиной 5 кА длительностью 2 с. (что равноценно нормативной эксплуатации в первом случае в течение 0,2 года, а во втором — 1,5 года), то фактический срабо-

РК РУСКАБЕЛЬ

Актуально

РЕСУРС КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

танный ресурс КЛ составит в первом случае $11,4 + 0,2 = 11,6$ года, а во втором: $7,5 + 1,5 = 9$ лет. Значения нормативного остаточного ресурса $R_{0, \text{ост}}$ будут соответственно равны: $20 - 11,6 = 8,4$ года и $20 - 9 = 11$ лет.

При необходимости с помощью формул (23) или (27) можно скорректировать эти значения с учётом дальнейших условий эксплуатации. Отметим, что целесообразно пользоваться наибольшими значениями фактического сработанного ресурса при расчётах сразу по обеим формулам, так как это повышает надёжность полученных результатов. Поэтому полный (в стационарном режиме и при коротком замыкании) фактический сработанный ресурс КЛ имеет смысл рассчитывать следующим образом: $11,4 + 1,5 = 12,9$ года, при этом $R_{0, \text{ост}} = 20 - 12,9 = 7,1$ года. Это есть верхняя граница фактического сработанного ресурса КЛ. Нижнюю границу фактического сработанного ресурса КЛ определяем по выражению: $7,5 + 0,2 = 7,7$ года, при этом $R_{0, \text{ост}} = 20 - 7,7 = 12,3$ года.

В заключение отметим, что:

- определение ресурса современных КЛ является актуальной задачей для обеспечения надёжного энергоснабжения потребителей;
- для вычисления ресурса КЛ применимы модели с использованием $\Delta\theta$ -градусных правил и закона Вант-Гоффа — Аррениуса;
- с целью обеспечения максимальной надёжности вычислений в качестве результатов расчёта сработанного ресурса КЛ по формулам $\Delta\theta$ -градусных правил и закону Вант-Гоффа — Аррениуса необходимо использовать наибольшие из полученных значений фактического сработанного ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / ГОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина». — Иваново, 2005. — 224 с.
2. Барнес С. Силовые кабели (конструкция, монтаж и эксплуатация): Пер. с англ.; под ред. С.С. Городецкого. — М.: Энергия, 1971. — 288 с.
3. Канискин В.А., Костенко Э.М., Таджибаев А.И. Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации // Электричество. — 1995. — № 5, с. 19—23.
4. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1996. — 464 с.
5. О проверке кабелей на возгорание при действии тока короткого замыкания в сетях собственных нужд электростанций: Циркуляр № Ц-2-

98 (З) от 16.03.1998. — М.: ПАО «ЕЭС России», 1998. — 6 с.

6. Таран В.П. Техническая диагностика при эксплуатации электрооборудования. — Киев: Урожай, 1978. — 152 с.
7. Короткевич М.А. Основные направления совершенствования эксплуатации электрических сетей. — Минск: Техноперспектива, 2003. — 373 с.
8. Электротехнический справочник. Т. 1. Под ред. П.Г. Грудинского, 5-е изд., испр. — М.: Энергия, 1975. — 776 с.
9. Белоусов Н.И. Электрические кабели и провода (теоретические основы кабелей и проводов, их расчет и конструкции). — М.: Энергия, 1971. — 512 с.



4.5. Методики оценки срабатывания ресурса КЛ

ISSN 0321-2653 ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН.
ISSN 0321-2653 IZVESTIYA VUZOV. SEVERO-KAVKAZSKIY REGION.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. 2018. № 3
TECHNICAL SCIENCE. 2018. No 3

УДК 621.315.3: 621.316.99

DOI: 10.17213/0321-2653-2018-3-70-79

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ, ВЫЗВАННОГО ЧАСТИЧНЫМИ РАЗРЯДАМИ

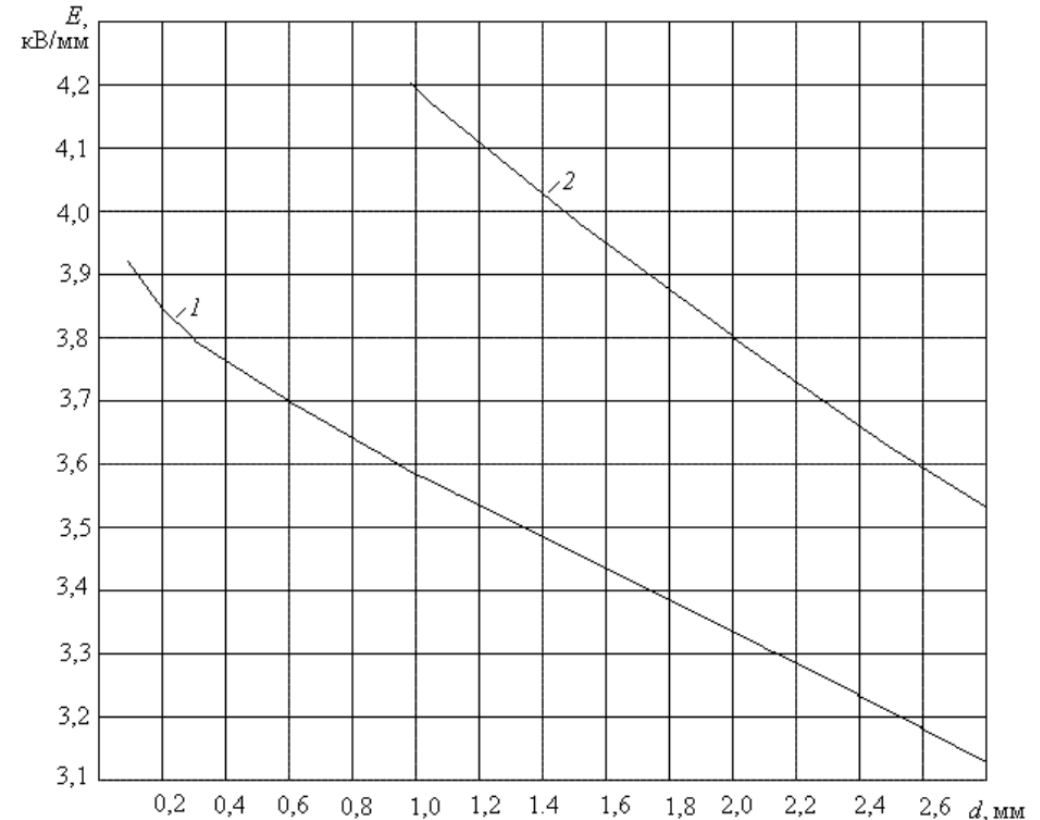
© 2018 г. Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго
Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

Заключение

На основании расчета характеристик ЧР установлена связь изменения напряжения пробоя ЧР $U_{В.пр}$ и кажущегося заряда q от размера включения в изоляции, а также изменения напряжения пробоя ЧР $U_{В.пр}$ и кажущегося заряда q от диэлектрической проницаемости изоляции ϵ . Показано, что наиболее оптимальным диагностическим параметром деструкции ИМ является температура. Предложена математическая модель прогнозирования появления включения, развития теплового пробоя в ИМ, вызванного ЧР. Приведена методика диагностирования ИМ в условиях эксплуатации. Анализ результатов показал, что измерение параметров ЧР позволяет в комплексе оценивать воздействие на ИМ различных факторов и определять степень его деградации. ЧР являются мерой степени электрического старения, и интенсивности внешних

воздействий температурных и др. оказывают существенное влияние на формирование и развитие включений изоляции. Установлено, что напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с предложенной формулой, а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании предложенной формулы. Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными.

Зависимость напряженности электрического поля от диаметра газового включения:
1) в полиэтиленовой изоляции; 2) электрическая прочность воздуха



Из статьи Сидельникова Л.Г. Методические основы анализа процессов в изоляции

Заключение

1. Технологии оценки ТС и управления им реализованы в настоящее время только в рамках нескольких СТО эксплуатирующих организаций. В существующей отраслевой НТД отсутствуют нормы и критерии оценки результатов диагностирования КЛ с изоляцией СПЭ. Сдерживающими факторами для широкого внедрения комплексного диагностирования в кабельных сетях являются:
 - ❑ отсутствие регламентированных требований оценки результатов и трудности их однозначной интерпретации,
 - ❑ отсутствие оснащенных соответствующим оборудованием ЭТЛ*.
2. В эксплуатации из-за нехватки персонала и испытательного оборудования, а также большой нагрузки (и особенно с учетом «кадрового голода») - зачастую даже типовой объем испытаний КЛ выполняется в сокращенном объеме. Это связано с объемом обслуживаемых электроустановок, обширным парком КЛ, особенно в городских сетях 6-20 кВ и схемах электроснабжения 6-35 кВ промышленных предприятий.
3. Диагностирование КЛ выполняется «по остаточному принципу». Это затрудняет формирование базы данных, которую целесообразно начинать по каждой КЛ с момента ее ввода в эксплуатацию. Однозначно трактовать результаты можно при «нормальном без отклонений» и «предаварийном состоянии» - во всех остальных случаях, как правило, назначается срок повторного диагностирования, предлагается учащенный контроль.
4. Оценка остаточного ресурса КЛ в первом приближении может быть выполнена как с учетом числа и параметров воздействий аварийных токов на конкретной КЛ, так и с учетом комплексного воздействия электрического поля (старение под действием ЧР) и температуры перегрева.
5. Существующие способы оценки остаточного (или сработанного) ресурса КЛ основаны преимущественно на тепловых моделях с привлечением уравнения Аррениуса и правила Вант-Гоффа. Основная проблема здесь та же - точность оценки определяется стабильностью условий эксплуатации и должна корректироваться с учетом реального графика нагрузки и после аварийных отказов.