

НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Ковригин Л.А., Сидельников Л.Г.

Пермский государственный технический университет, ООО «ТестСервис», г. Пермь

Состояние вопроса

При выработке заключения о техническом состоянии кабельной линии важным вопросом является оценка результатов диагностики. Для этого необходимо иметь критерии оценки по уровню (ЧР), частоте, интенсивности и т.п. Следует отметить, что в Европе на фирмах эксплуатирующих установки OWTS имеются методики и соответственно критерии по оценке результатов диагностики. Однако применение этих методик и критериев в России пока представляется не целесообразным.

Так, например, в Германии для аппаратуры OWTS предельным значением принят уровень частичных разрядов равный 1000 пК, а в Италии 1200 пК. Уровни разрядов, превышающие указанные значения не допустимы, а кабельная линия подлежит ремонту. Имеющиеся в этих странах критерии диагностики разбиты на ряд групп, а методики на основе созданных баз данных позволяют определить вид или причину дефекта. Этим достигается впоследствии устранение причин вызывающих те или иные дефекты за счет совершенствования технологии монтажа кабельных линий.

В настоящее время характерным для России является эксплуатация силовых кабельных линий до предельного физического состояния, при этом уровень (ЧР) в них не редко составляет более 10000 пК. Количество кабельных линий, имеющих дефекты с уровнем (ЧР) более 5000 пК, составляет более 65%.

Применение современных диагностических методов для контроля технического состояния силовых кабельных линий серьезным образом сдерживается по причине отсутствия в России нормативной документации и соответствующих прав органов надзора. Работы выполняются в инициативном порядке и не являются обязательными для собственников линий. Вместе с тем, ситуация по техническому состоянию линий и не только их является близкой к критическому состоянию. Кроме того, наблюдается большой дефицит специалистов способных выполнять работы, анализ и экспертизу силового электрооборудования. Практически не выпускается оборудование требуемого качества для диагностических испытаний. В то время как за рубежом этому вопросу уделяется большое внимание на уровне государственных программ.

На рис. 1 представлено распределение проблемных кабельных линий на промышленных предприятиях по годам ввода в эксплуатацию. По этой диаграмме можно проследить качество монтажа кабельных линий в Пермском крае. За исключением отдельных всплесков (1960, 1968, 1971), начиная, с 1978 года качество работ резко ухудшилось. То есть, не смотря на совершенствование технологии производства кабелей и кабельной арматуры, по причине низкого качества работ при монтаже кабельных линий, надежность электроснабжения предприятий снизилась и весьма существенно.

В перспективе техническое состояние высоковольтных кабельных линий должно соответствовать европейским нормам. Поэтому следует обратить внимание на совершенствование технологии монтажа кабельных линий и соответствующее повышение требований по оценке их технического состояния.

Физические и химические процессы, протекающие в изоляции под воздействием частичных разрядов и вызывающие ее старение, в достаточной мере изучены [1–56]. Разработаны методы измерения параметров частичных разрядов, которые реализованы в отечественных и зарубежных приборах различных конструкций (R2000/N, R-400, R500TM, УКИ-4, УКИ-5, УКИ-6И, УКИ-7И, РМ-3Ам, «Импульс», ИЧР-201, ЭЛМИН-3,

СКИ-2, РЧРВ-1, OWTS и др.). В связи с появлением на рынке приборов контроля состояния изоляции неразрушающими методами, возникла возможность диагностировать состояние изоляции и прогнозировать ее остаточный ресурс.

Достоверная диагностика состояния изоляции электротехнического оборудования неразрушающими методами позволит отказаться от профилактики изоляции разрушающими методами контроля, которые, во многих случаях, приводят к уменьшению ресурса и несвоевременному и непредсказуемому пробое изоляции.

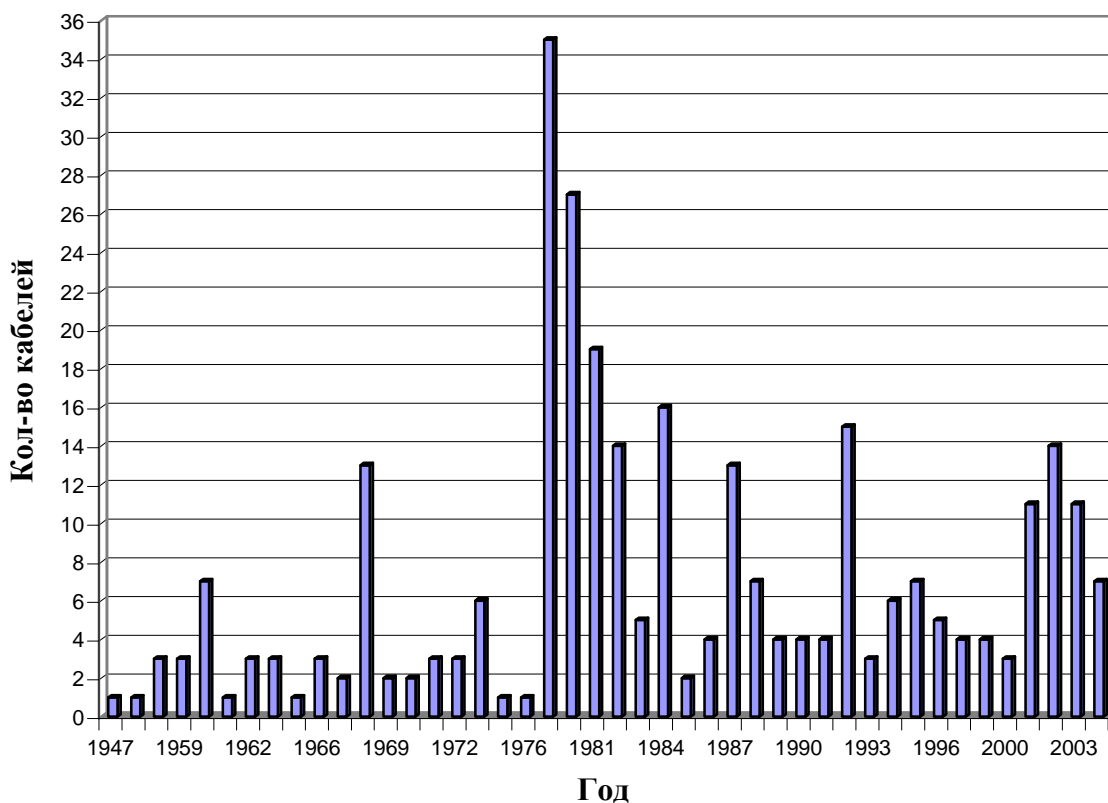


Рис. 1. Распределение кабельных линий с неудовлетворительным техническим состоянием по годам ввода в эксплуатацию

Проверка работоспособности кабельной линии путем приложения повышенного постоянного напряжения обоснована после монтажа или ремонта и последующей диагностики, и, как исключение, при отсутствии технической возможности для применения диагностических неразрушающих методов.

Применение неразрушающих методов испытаний изоляции кабельных линий

Применение разрушающих методов испытания изоляции кабельных линий, например, повышенным постоянным напряжением вызывает сокращение их ресурса, так как в проблемных местах изоляции идут ионизационные процессы (частичные разряды) разрушающие изоляцию. Испытание изоляции кабельных линий повышенным постоянным напряжением целесообразно проводить при вводе их в эксплуатацию и после ремонта, а также при отсутствии средств неразрушающего контроля. Цель испытаний повышенным напряжением заключается в проверке электрической прочности изоляции линий.

Определение технического состояния изоляции кабельных линий рекомендуется производить неразрушающими методами испытаний. Применение таких методов не травмирует изоляцию, т.е. не сокращает ресурс кабелей и муфт. Одним из

неразрушающих методов испытания изоляции является *метод измерения частичных разрядов с осциллирующим напряжением*. Аппаратура типа OWTS, реализующая этот метод, выпускается фирмой Seba KMT, Германия. В отличие от аппаратуры, используемой на кабельных заводах для измерения частичных разрядов и работающей на частоте 50Гц, OWTS работает на резонансной частоте, определяемой штатной индуктивностью и емкостью линии. В настоящее время OWTS является наиболее совершенной аппаратурой для измерения ЧР эксплуатируемых линий и выпускается на напряжения до 250кВ. Этот метод позволяет определить:

- распределение уровня частичных разрядов по длине линии;
- распределение числа частичных разрядов по длине линии;
- зависимость уровня частичных разрядов от напряжения;
- напряжение возникновения ЧР;
- напряжение гашения ЧР;
- тангенс угла диэлектрических потерь;
- электрическую емкость.

Из указанных возможностей *метода измерения частичных разрядов с осциллирующим напряжением* с помощью OWTS в качестве основных в ООО «ТестСервис», г. Пермь, были выбраны:

- распределение уровня частичных разрядов по длине линии;
- распределение числа частичных разрядов по длине линии;
- напряжение возникновения ЧР.

На основании указанных параметров определяются дефектные места в кабельной линии и степень развития дефектов.

Частичные разряды могут быть измерены путем:

- отключения кабельной линии от сети и подачи высокого синусоидального напряжения (как правило, промышленной частоты) от внешнего источника;
- отключения кабельной линии, ее заряда до высокого напряжения и последующего разряда на индуктивность с получением синусоидальных осциллирующих затухающих колебаний на резонансной частоте;
- измерения при фазном напряжении с помощью датчика ЧР, установленного между оболочкой кабеля и землей.

Первый метод целесообразно применять в стационарных условиях, где размеры высоковольтного источника синусоидального напряжения не имеют существенного значения. При этом применяются высоковольтные трансформаторы с низким уровнем собственных частичных разрядов совместно с фильтрами, рис.2.

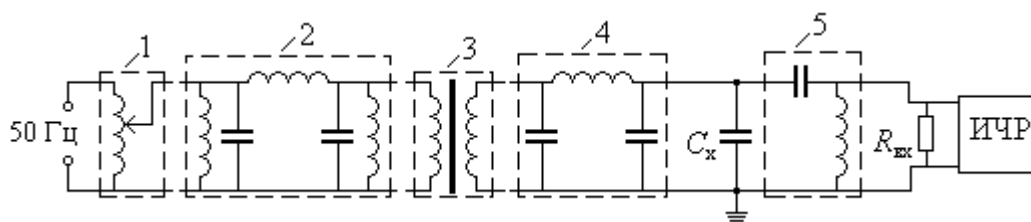


Рис. 2. Схема измерения частичных разрядов в изоляции при синусоидальном незатухающем напряжении

На рис. 2: 1 – регулятор напряжения; 2 – полосовой фильтр; 3 – высоковольтный трансформатор; 4 – фильтр низких частот; 5 – фильтр высоких частот; C_x – измеряемый объект (кабель); ИЧР – измеритель частичных разрядов $R_{вх}$ – входное сопротивление ИЧР.

Второй метод используется в передвижных лабораториях, для получения удовлетворительных массогабаритных характеристик источника высокого напряжения, рис. 3. В этом методе синусоидальное осциллирующее напряжение возникает при разряде

заряженного кабеля емкостью C_x на штатную индуктивность L . Т.е. источником высокого напряжения является емкость линии. Собственная частота колебательного контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_x}}$$

Синусоидальные колебания затухают за счет диэлектрических потерь в изоляции и выделения энергии на активном сопротивлении катушки (~20 Ом) и цепи. Величина тока в колебательном контуре в основном определяется активным сопротивлением цепи, так как частота колебаний близка резонансной частоте. Частота колебаний при длине кабельной линии (60-3000) м составляет ~(1300-200) Гц. Так как длина волны колебаний значительно превышает протяженность кабельной линии, то по всей линии имеет место осциллирующее синусоидальное напряжение, затухающее во времени.

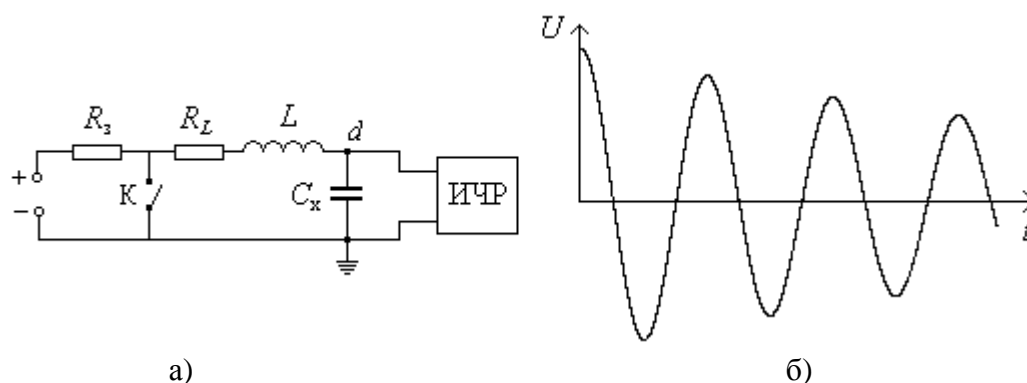


Рис. 3. Определение частичных разрядов в изоляции методом измерения частичных разрядов с осциллирующим напряжением

На рис. 3, а – схема измерения; б – напряжение в точке d ; R_3 – зарядное сопротивление; L – катушка индуктивности; R_L – активное сопротивление обмотки катушки индуктивности; K – высоковольтный ключ; ИЧР – измеритель частичных разрядов

Достоинства этого метода:

- не требуется высоковольтный источник напряжения промышленной частоты;
- измерительная схема не связана электрически с внешней сетью, что способствует снижению уровня помех;
- применение повышенных частот вызывает увеличение тока ЧР и росту отношения сигнал-шум;
- ИЧР имеет малое входное сопротивление, что также способствует увеличению тока ЧР.

По причине особенностей схемы измерений ЧР (кажущихся разрядов) этим методом их амплитуда значительно больше, чем амплитуда разрядов при испытании кабелей на заводах изготовителях, где используется другой метод. Поэтому применяемые на кабельных заводах нормативы по уровню частичных разрядов в данном случае не могут быть использованы.

На рис. 4а представлена схема измерения ЧР при подводе к линии незатухающего синусоидального напряжения, применяемая на кабельных заводах. В этом случае входное сопротивление ИЧР, работающего в режиме вольтметра, $R_{вх1}$, велико, поэтому ток разряда емкости C_b замыкается по пути 5, не проникая во внешнюю цепь. При работе с помощью метода измерения частичных разрядов с осциллирующим напряжением, рис. 4б, ток ЧР усиливается за счет разряда через малое сопротивление ИЧР, работающего в режиме

амперметра с малым входным сопротивлением $R_{вх1}$. Этими особенностями рассмотренных схем в основном обусловлены различные величины ЧР, измеряемые на одном и том же объекте.

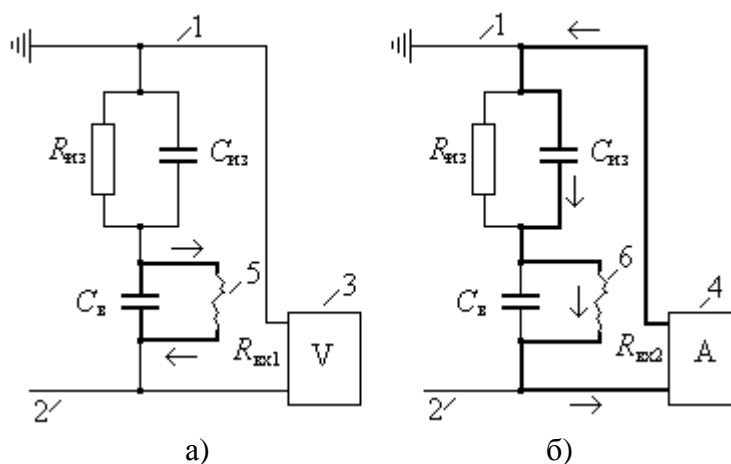


Рис. 4. Схемы измерения ЧР

На рис.4: *а* – незатухающая синусоида; *б* – затухающая синусоида; $C_{из}$ – емкость изоляции последовательно включенная с емкостью воздушного включения $C_в$; 1 – оболочка кабеля, 2 – разомкнутый конец кабеля, 3 – измеритель частичных разрядов с большим входным сопротивлением; 4 – измеритель частичных с малым входным сопротивлением; разрядов, 5, 6 – частичный разряд.

Третий метод имеет следующие существенные недостатки:

- по электрически связанной цепи проникают ЧР от другого оборудования;
- не фиксируются ЧР между фазами, рис. 5;
- частичные разряды, возникающие в области 1 между фазой землей, измеряются ИЧР;
- ток разрядов, возникающих в области 2, замыкается между фазами и не проходит через измеритель.

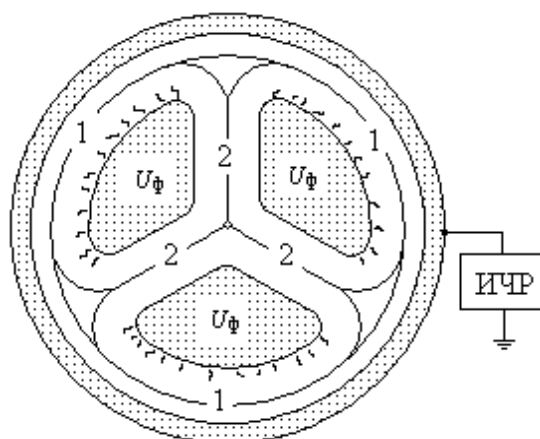


Рис. 5. Схема измерения ЧР третьим методом

На рисунке 5: 1 – область изоляции между фазой и землей, а 2 – область изоляции между фазами.

В качестве параметров, по которым определяется место положения проблемных мест в кабельной линии, путем экспертной оценки были выбраны:

- максимальная величина ЧР, определенная в локальном месте усреднением 3–5 независимых измерений;
- число ЧР, определенное в локальном месте усреднением 3–5 независимых измерений;
- напряжение возникновения ЧР, определенное в локальном месте усреднением 3–5 независимых измерений.

Практически количество измерений зависит от состояния изоляции, числа проблемных мест и поэтому может быть значительно более пяти. Кроме того, количество необходимых измерений зависит от длины линии и растет с ее увеличением.

Методика расчета допустимого уровня частичных разрядов в кабельной линии

Расчет произведен на примере кабельной линии на напряжение 35 кВ. Кабель со сшитой полиэтиленовой изоляцией марки АПВВнг 1х185+50. В качестве исходных данных взяты результаты диагностики кабельных линий, полученные аппаратом OWTS 25 (модуль М 710). В процессе испытаний кабельная линия заряжалась до напряжения:

$$U_3 = 1,15 \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = 33 \text{кВ},$$

где 1,15 – коэффициент, переводящий номинальное напряжение в наибольшее рабочее напряжение в режиме холостого хода.

Для расчета выбирались разряды, имеющие максимальное значение. При этом в среднем на 100 м длины линии выбирался один ЧР. Статистическая обработка экспериментальных результатов производилась по общепринятой методике, в соответствии, с которой среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

дисперсия

$$D = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

а среднее квадратичное отклонение

$$S = \sqrt{D},$$

где n – число измерений; x_i – значения измеряемых величин.

Асимметрия распределения

$$A = \frac{1}{S^3 (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3,$$

а эксцесс

$$E = \frac{1}{S^4 (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4.$$

Соответственно собственная дисперсия асимметрии и эксцесса

$$D_A = \frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}, \quad D_E = \frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}.$$

На рис.6 представлена гистограмма и кривая вероятности величины частичных разрядов, Q нКл, в кабельных линиях, полученные в результате обработки результатов измерений. На рис.7 представлена также гистограмма и кривая вероятности величины частичных разрядов, Q нКл, с учетом эксцесса и асимметрии.

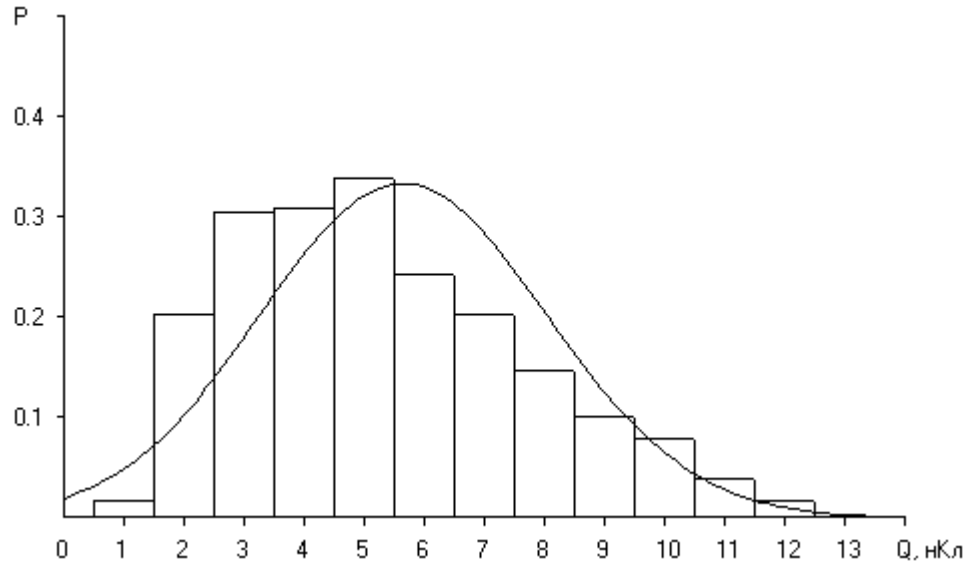


Рис.6. Гистограмма и кривая вероятности величины частичных разрядов в кабельной линии на напряжение 35кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

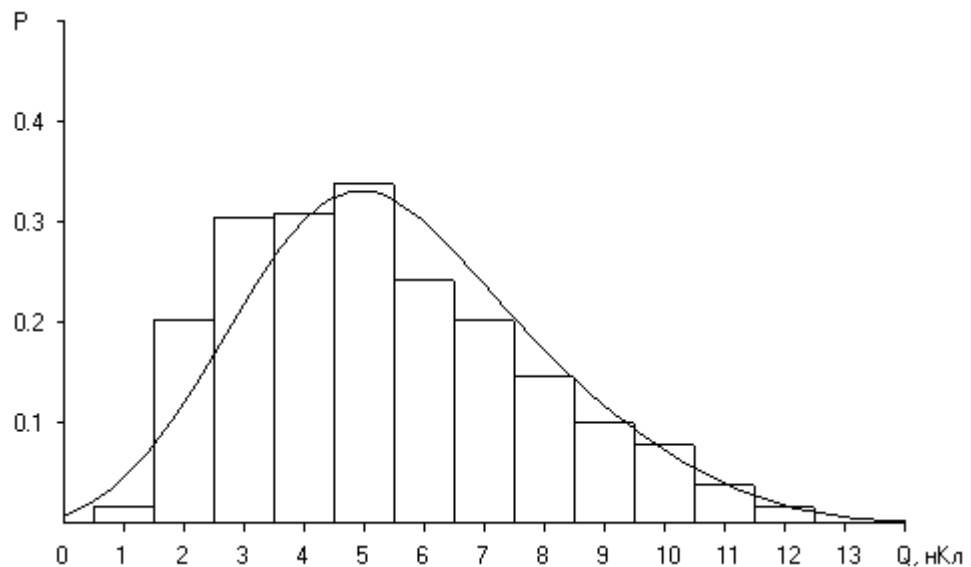


Рис.7. Гистограмма и кривая вероятности величины частичных разрядов в кабельной линии на напряжение 35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена с учетом эксцесса и асимметрии

В табл.1. представлены результаты статистической обработки измерений частичных разрядов. Согласно критерию Чебышева, можно принять гипотезу о нормальности распределения если

$$|A| \leq 3\sqrt{D_A} \quad \text{и} \quad |E| \leq 5\sqrt{D_E}.$$

Учитывая, что $3\sqrt{D_A} = 0,39$ и $5\sqrt{D_E} = 1,27$, то для частичных разрядов с $A = 0,57 > 3\sqrt{D_A} = 0,39$ (по асимметрии закон распределения отличается от нормального закона, но близок к нему) и $E = 0,40 < 5\sqrt{D_E} = 1,27$ (по эксцессу закон нормальный).

Таблица 1.

Результаты статистической обработки измерений частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 35 кВ (кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена)

№ п/п	Параметр	Обозначение	ЧР
1	Число измерений	n	355
2	Среднее арифметическое	\bar{x} , пКл	5,68
3	Дисперсия	D	5,73
4	Среднее квадратичное отклонение	S , пКл	2,39
5	Асимметрия	A	-0,57
6	Эксцесс	E	-0,40
7	Собственная дисперсия асимметрия	D_A	0,017
8	Собственная дисперсия эксцесса	D_E	0,065
9	$3\sqrt{D_A}$		0,39
10	$5\sqrt{D_E}$		1,27
11	Нормальный закон распределения	$ A \leq 3\sqrt{D_A}$	$0,57 > 0,39$; нет
12	Нормальный закон распределения	$ E \leq 5\sqrt{D_E}$	$0,4 < 1,27$; да

На рис.8 пунктирной линией обозначен уровень 0,05 и показаны заштрихованные области, которые составляют 5% площади, ограниченной кривой. С надежностью 95%, т.е. для 95 кабелей из 100, устанавливаются следующие нормы:

- при уровне ЧР в кабельной линии меньше 1200 пКл (рис.8, точка *a*), последующую диагностику нужно проводить через 5 лет;
- при уровне ЧР больше 5000 пКл (точка *b*) последующую диагностику следует проводить через 1 год;
- при уровне ЧР больше 10500 пКл (точка *c*) линия подлежит ремонту в течение 1 года;
- при уровне ЧР больше 14000 пКл (точка *d*) линия немедленно подлежит ремонту.

Сроки принятия решений определены на основании опыта исследований, т.е. являются экспертными величинами. В ряде случаев сроки принятия решений могут быть изменены на основании дополнительной информации полученной другими диагностическими методами или испытаниями. Статистическая формализация сроков и их уточнение возможна при достаточно большом объеме информации, полученной в течение длительного времени.

Оценка принадлежности измеренных величин генеральной совокупности производилась по формуле

$$|x_i - \bar{x}| \leq S \left[t^2(\sqrt{P_0}, n) + \frac{1}{n} t^2(P_0, n) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где x_i – измеренные значения; \bar{x} – среднее значение; S – среднее квадратичное отклонение; t – критерий Стьюдента; P_0 – доверительная вероятность; n – число измерений.

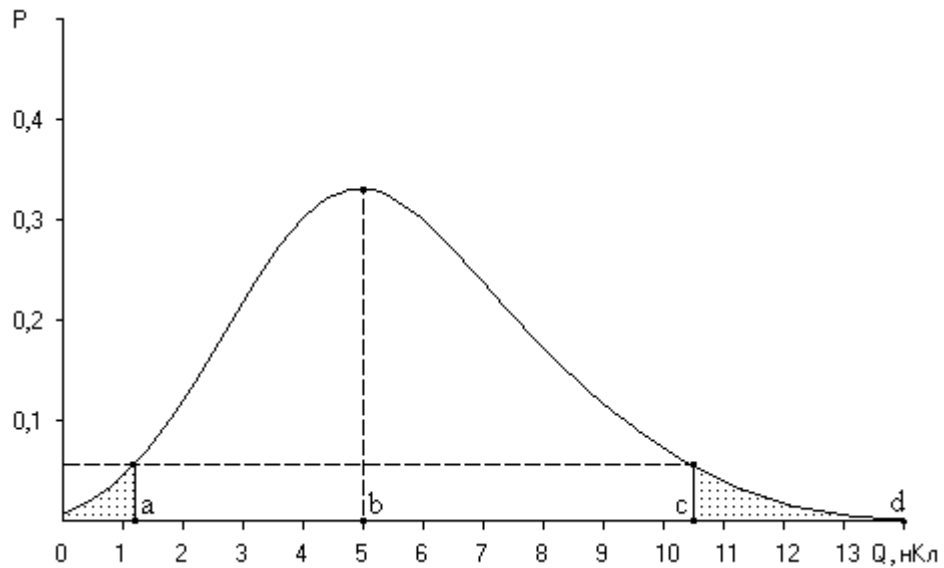


Рис.8. Кривая вероятности величины частичных разрядов в кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена с учетом эксцесса и асимметрии: *a* - минимальный уровень ЧР; *b* – максимальный уровень ЧР

Доверительная вероятность была принята $P_0 = 0,99$, так как точность измерения системой OWTS составляет 1%. Заштрихованные на гистограмме области не соответствуют генеральной совокупности.

Методика расчета напряжения возникновения и гашения частичных разрядов в кабельной линии

Метод измерения частичных разрядов с осциллирующим напряжением позволяет определить в кабельных линиях напряжение зажигания и гашения частичных разрядов. На рис. 9 показана затухающая синусоида осциллирующего напряжения в линии и частичные разряды в функции времени. Напряжение зажигания ЧР определяется по моменту появления частичных разрядов. В некоторый момент времени, при $U = U_r$, частичные разряды прекращаются. Это напряжение и есть напряжению гашения частичных разрядов.

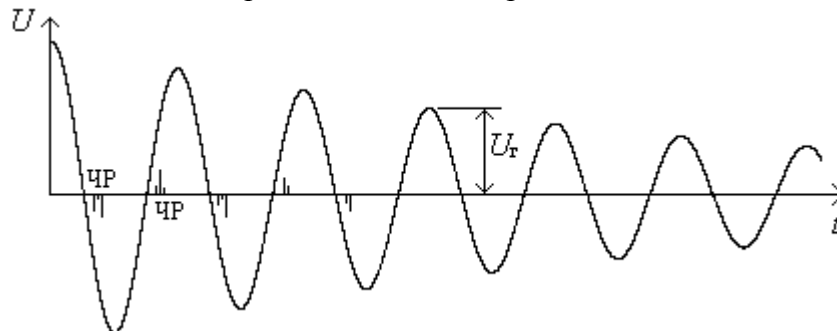


Рис.9. Определение напряжения гашения частичных разрядов: ЧР – частичные разряды; U_r - напряжения гашения ЧР

Многочисленные измерения ЧР в кабельных линиях, позволили построить кривые вероятности их возникновения и гашения. Статистическая обработка экспериментальных результатов производилась по выше приведенным формулам. На рис.10 представлены гистограмма и плотность распределения напряжения возникновения и гашения частичных

разрядов (амплитудные значения) в кабельных линиях с бумажно-масляной кабелей изоляцией на напряжение 6 кВ.

В табл.2 представлены статистические результаты напряжений возникновения разрядов. Из которых видно, что среднее значение напряжения возникновения частичных разрядов ($U_m = 5,8$ кВ).

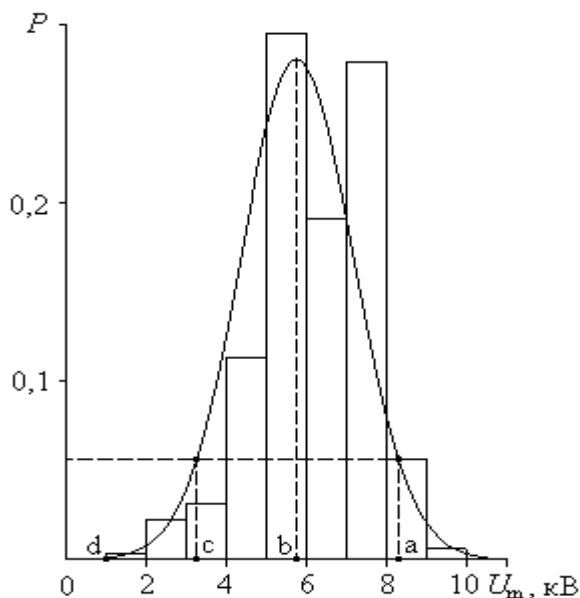


Рис.10. Гистограмма и плотность распределения напряжения возникновения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 6 кВ

Таблица 2.

Статистические результаты напряжения возникновения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 6 кВ (кабели с бумажно-масляной изоляцией)

№ п/п	Параметр	Обозначение	При напряжении возникновения ЧР
1	Число измерений	n	318
2	Среднее арифметическое	\bar{x} , кВ	5,80
3	Дисперсия	D	2,01
4	Среднее квадратичное отклонение	S , кВ	1,42
5	Асимметрия	A	0,42
6	Экссесс	E	-0,11
7	Собственная дисперсия асимметрии	D_A	0,0185
8	Собственная дисперсия эксцесса	D_E	0,0720
9	$3\sqrt{D_A}$		0,41
10	$5\sqrt{D_E}$		1,34
11	Нормальный закон распределения	$ A \leq 3\sqrt{D_A}$	$0,42 > 0,41$; нет
12	Нормальный закон распределения	$ E \leq 5\sqrt{D_E}$	$0,11 < 1,34$; да

Учитывая критерий Чебышева, можно принять гипотезу о нормальном законе распределения напряжения возникновения разрядов, если

$$|A| \leq 3\sqrt{D_A}, \quad |E| \leq 5\sqrt{D_E}.$$

Так как $3\sqrt{D_A} = 0,41$ и $5\sqrt{D_E} = 1,34$, то при $A = 0,42 > 0,41 = 3\sqrt{D_A}$ по асимметрии закон распределения возникновения разряда незначительно отличается от нормального, однако $E = 0,11 < 1,34 = 5\sqrt{D_E}$, т.е. по эксцессу закон распределения нормальный.

С надежностью 95% рекомендуются следующие нормы для кабельных линий на напряжение 6 кВ с пропитанной бумажной изоляцией:

- при напряжении (амплитудное значение) возникновения ЧР в кабельной линии более чем $U_m = 8,2$ кВ (рис.10, точка *a*), последующую диагностику проводить через 5 лет;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 5,9$ кВ (точка *b*) последующая диагностика через 1 год;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 3,2$ кВ (точка *c*) линия подлежит ремонту в течение 1 года;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 1$ кВ (точка *d*) линия немедленно подлежит ремонту.

На рис.11 изображена кривая распределения напряжения возникновения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией.

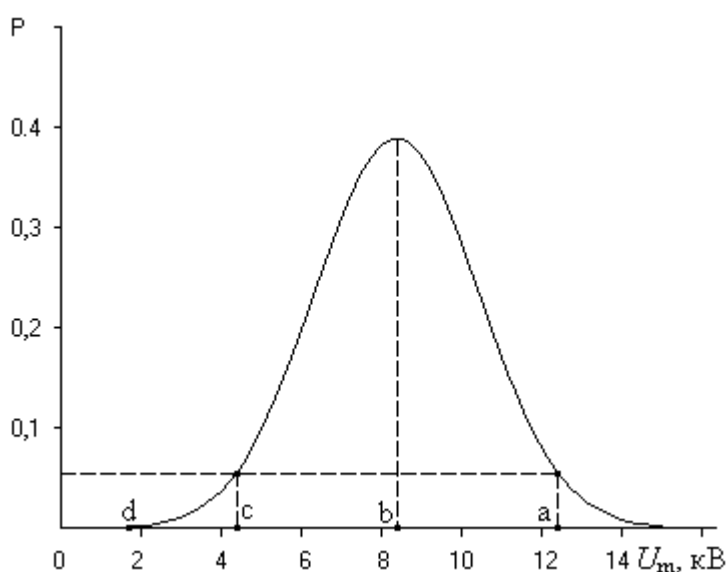


Рис.11. Плотность распределения напряжения (амплитудное значение) возникновения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией

С надежностью 95% рекомендуются следующие нормы для кабельных линий на напряжение 10 кВ с пропитанной бумажной изоляцией:

- при напряжении (амплитудное значение) возникновения ЧР в кабельной линии более чем $U_m = 12,5$ кВ (рис.11, точка *a*), последующую диагностику нужно проводить через 5 лет;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 8,5$ кВ (точка *b*) последующую диагностику проводить через 1 год;

- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 4,5$ кВ (точка *c*) линия подлежит ремонту в течение 1 года;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 1,5$ кВ (точка *d*) линия немедленно подлежит ремонту.

Плотность распределения напряжения (амплитудное значение) возникновения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией приведена на рис.12. Анализ распределения также производился с допустимой вероятностью 95%. Полученные нормативы оценки технического состояния справедливы для всех линий с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 35кВ, независимо от технологии сшивки. Однако, следует отметить, что статистическая обработка выполнялась по ограниченному объему информации из-за малого количества эксплуатируемых линий с такой изоляцией.

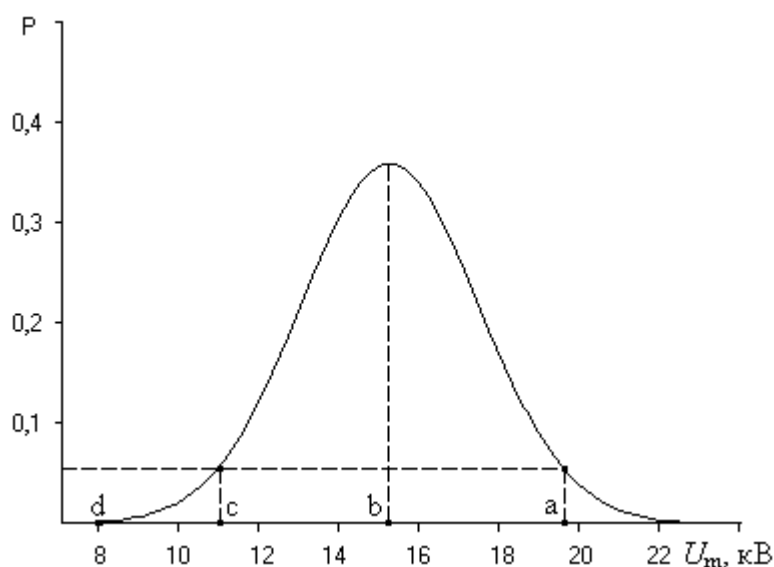


Рис.12. Плотность распределения напряжения (амплитудное значение) возникновения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией

Рекомендуются следующие нормы для кабельных линий этого типа:

- при напряжении (амплитудное значение) возникновения ЧР в кабельной линии более чем $U_m = 19,5$ кВ (рис.12, точка *a*), последующую диагностику нужно проводить через 5 лет;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 15$ кВ (точка *b*) последующую диагностику следует проводить через 1 год;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 11$ кВ (точка *c*) линия подлежит ремонту в течение 1 года;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 8$ кВ (точка *d*) линия немедленно подлежит ремонту.

На рис. 13 представлена плотность распределения напряжения (действующее значение) возникновения и гашения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 6 кВ с поливинилхлоридной изоляцией. В отличие от линий из сшитого полиэтилена и бумажно-масляной изоляцией общепромышленного назначения, кабели для этих линий выпускаются кабельными заводами только для напряжения до 6кВ.

Диагностика линий с поливинилхлоридной изоляцией отличается большей сложностью из-за особенностей конструкции кабеля. Наибольшие трудности возникают

при локализации проблемных мест в этих линиях. Схожие проблемы возникают в кабелях специального назначения, например, при диагностике погружаемых линий для нефтяных и газовых скважин, имеющих изоляцию из сшитого полиэтилена. Однако линии с поливинилхлоридной изоляцией могут диагностироваться методом частичных разрядов. Задачу диагностики погруженных в скважинах линий пока решить не удалось.

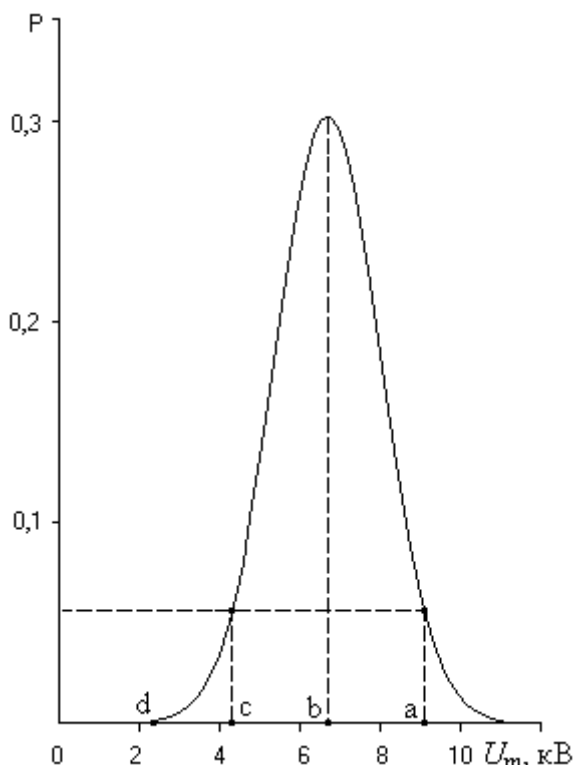


Рис.13. Плотность распределения напряжения возникновения ЧР в кабельных линиях на напряжение 6 кВ поливинилхлоридной изоляцией

Рекомендуются следующие нормы для кабельных линий на напряжение 6 кВ с поливинилхлоридной изоляцией:

- при напряжении (амплитудное значение) возникновения ЧР в кабельной линии более чем $U_m = 9$ кВ (рис.13, точка *a*), последующую диагностику нужно проводить через 5 лет;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 6,5$ кВ (точка *b*) последующую диагностику следует проводить через 1 год;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 4,5$ кВ (точка *c*) линия подлежит ремонту в течение 1 года;
- при напряжении возникновения ЧР менее чем $U_m = 2,5$ кВ (точка *d*) линия немедленно подлежит ремонту.

Методика расчета допустимого числа частичных разрядов в локальном месте линии за один цикл измерения

На рис.14 представлена гистограмма числа разрядов в локальных местах кабельной линии, полученная за один цикл измерения методом затухающей синусоиды. На расстоянии 70 м зарегистрировано 56 разрядов за время их измерения на кабельной линии с пропитанной бумажной изоляцией напряжением 10 кВ, при зарядном напряжении 14 кВ.

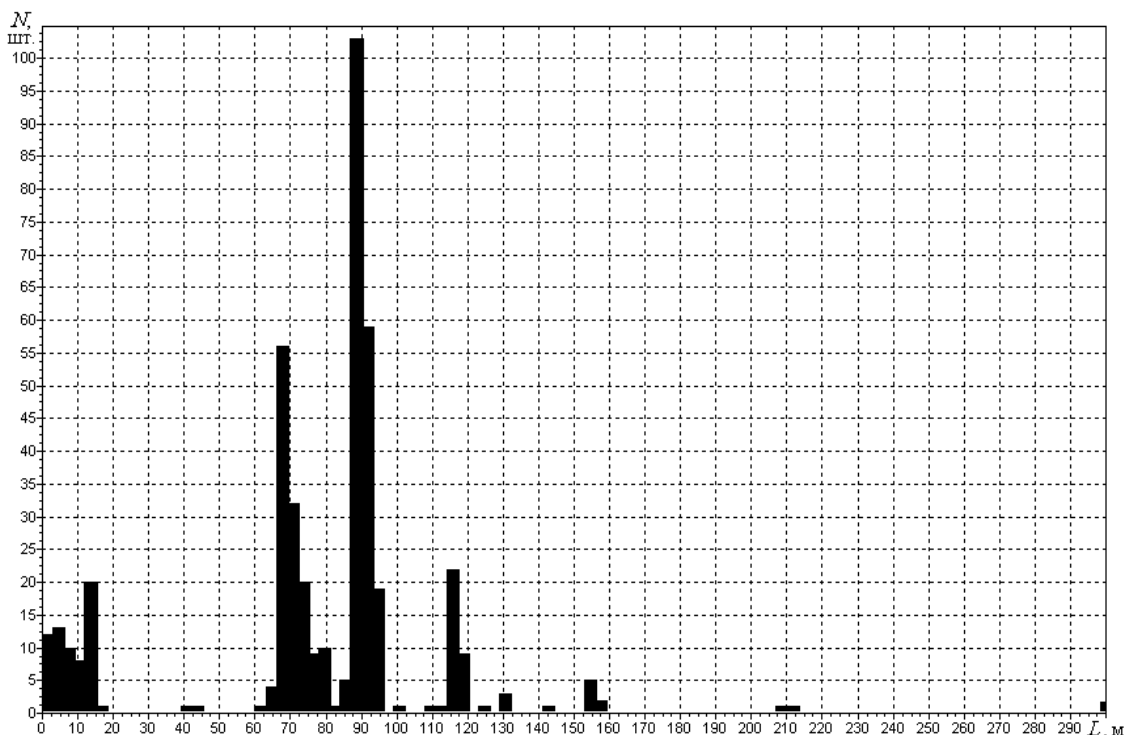


Рис.14. Гистограмма числа разрядов в локальных местах кабельной линии, полученная за один цикл измерения методом затухающей синусоиды

На рис.15 представлена плотность распределения числа частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией.

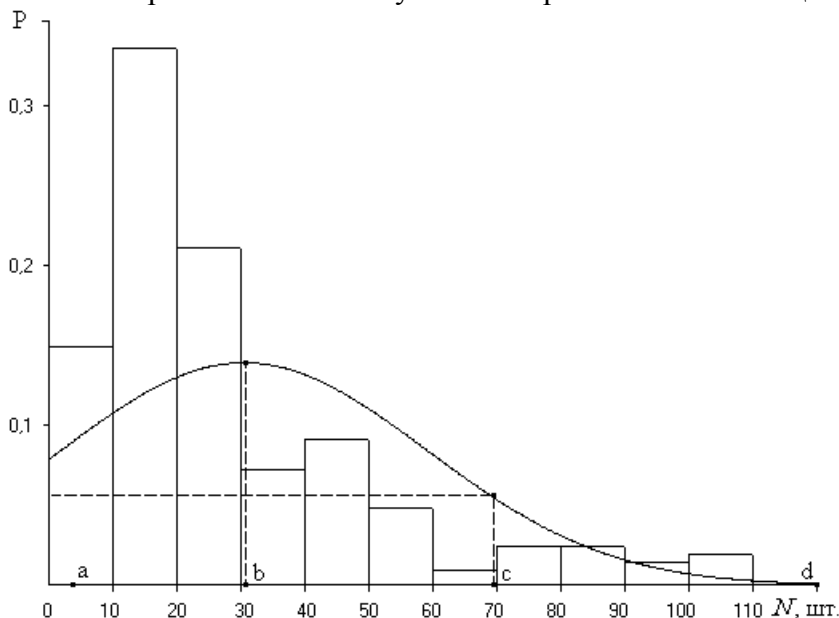


Рис.15. Плотность распределения числа частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 10 кВ

С достоверностью 95% рекомендуются следующие нормы для кабельных линий на напряжение 10 кВ с пропитанной бумажной изоляцией:

- при числе ЧР в локальном месте кабельной линии менее чем $N = 4$ (рис.15, точка *a*), последующую диагностику следует проводить через 5 лет;
- при числе ЧР в локальном месте более чем $N = 30$ (точка *b*) последующую диагностику необходимо проводить через 1 год;

- при числе ЧР в локальном месте более чем $N = 70$ (точка c) линия подлежит ремонту в течение 1 года;
- при числе ЧР в локальном месте более чем $N = 120$ (точка d) линия немедленно подлежит ремонту.

Плотность распределения числа частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией представлена на рис. 16.

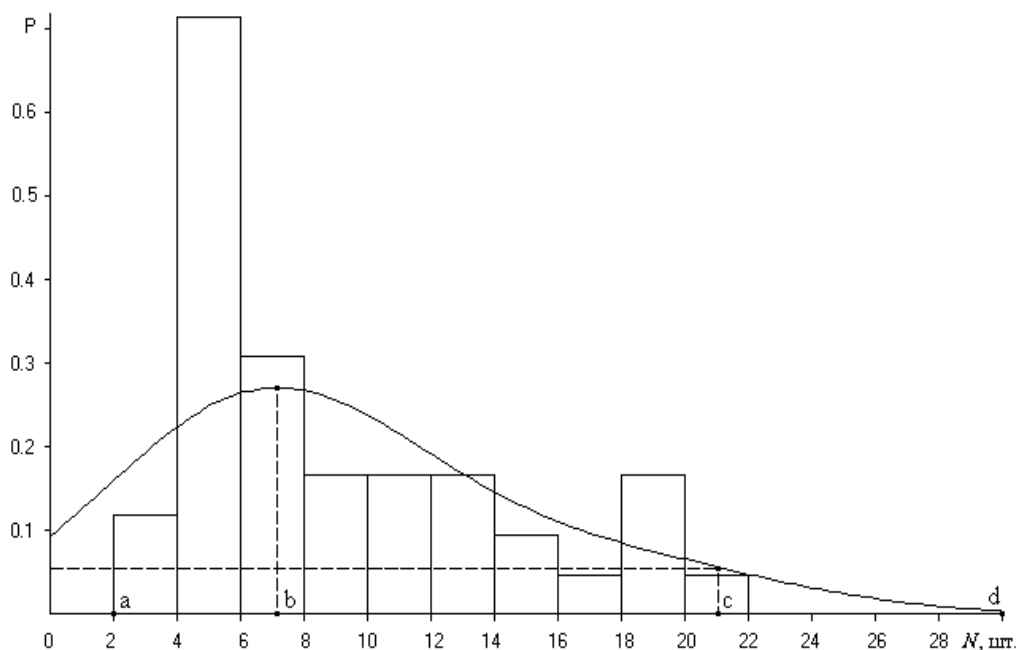


Рис.16. Плотность распределения числа частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией

С надежностью 95% для кабельных линий на напряжение 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией рекомендуются следующие нормы:

- при числе ЧР в локальном месте кабельной линии менее чем $N = 2$ (рис. 23, точка a), последующую диагностику нужно проводить через 5 лет;
- при числе ЧР в локальном месте более чем $N = 7$ (точка b) последующую диагностику проводить через 1 год;
- при числе ЧР в локальном месте более чем $N = 21$ (точка c) линия подлежит ремонту в течение 1 года;
- при числе ЧР в локальном месте более чем $N = 30$ (точка d) линия немедленно подлежит ремонту.

Примечание

Значения N для кабельных линий с полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляцией приведены к единой норме.

Нормативные показатели для определения состояния изоляции по частичным разрядам

Нормы величин ЧР разработаны для метода затухающей синусоиды и *не могут быть использованы в других методах*. Кабель заряжается до амплитудного значения

наибольшего рабочего напряжения $U_3 = 1,15\sqrt{2}U_n$. Нормы устанавливаются с надежностью 95%. В табл. 3–10 индекс, характеризующий вид производимых операций после тестирования, присваивается по наихудшему показателю.

Табл. 3.

Зарядные напряжения при измерении максимальных величин ЧР и числа ЧР

№ п/п	Класс напряжения, кВ	Зарядное напряжение при определении ЧР при фазном напряжении, кВ	Зарядное напряжение при определении ЧР при линейном напряжении, кВ
1.	6	5,6	9,8
2.	10	9,4	16,2
3.	20	18,8	32,5
4.	35	32,9	56,9

Табл. 4.

Линии с кабелями с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 6 кВ

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностик а через 5 лет	Область малого риска, диагностик а в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	1200	1200-7500 5650	7500-15000	> 15000
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,25	0,25-0,5	0,5-1,5	>1,5
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	8,2	5,9-8,2	3,2-5,9	<3,2

Табл. 5.

Линии с кабелями с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 10 кВ

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностик а через 5 лет	Область малого риска, диагностик а в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	1200	1200-7500 6700	7500-15000	> 15000
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,25	0,25-0,5	0,5-1,5	>1,5
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	12,5	8,5-12,5	4,5-8,5	<4,5

Табл. 6.

Линии с кабелями с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение **20 кВ**

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностика через 5 лет	Область малого риска, диагностика в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	1200	1200-7500	7500-15000	> 15000
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,25	0,25-0,5	0,5-1,5	>1,5
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	28	17-28	10-17	<10

Табл. 7.

Линии с кабелями бумажной пропитанной изоляцией на напряжение **35 кВ**

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностика через 5 лет	Область малого риска, диагностика в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	1200	1200-7500	7500-15000	> 15000
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,25	0,25-0,5	0,5-1,5	>1,5
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	49	29-49	15-29	<15

Табл. 8.

Линии с кабелями с полиэтиленовой изоляцией на напряжение **10 кВ**

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностика через 5 лет	Область малого риска, диагностика в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	1200	1200-5000	5000-10500	>10500
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,066	0,066-0,23	0,23-0,7	>0,7
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	14	8-14	5-8	<5

Табл.9.

Линии с кабелями с полиэтиленовой изоляцией на напряжение **20 кВ**

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностика через 5 лет	Область малого риска, диагностика в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	1200	1200-5000	5000-10500	>10500
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,066	0,066-0,23	0,23-0,7	>0,7
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	28	16-28	10-16	<10

Табл. 10.

Линии с кабелями с полиэтиленовой изоляцией на напряжение **35 кВ**

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностика через 5 лет	Область малого риска, диагностика в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	1200	1200-5000 5800	5000-10500 9000	>10500 9000
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,066	0,066-0,23	0,23-0,7	>0,7
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	50	28-49	20-28	<20

Табл. 11.

Линии с кабелями с изоляцией из поливинилхлоридного пластика на напряжение **6 кВ**

№ п/п	Наименование теста		Индекс 0	Индекс 1	Индекс 2	Индекс 3
			Норма, диагностика через 5 лет	Область малого риска, диагностика в течение года	Область риска, ремонт в течение года	Область предельного риска, ремонт
1.	Максимальная величина ЧР в локальном месте	q , пКл	720	5000	7500	8400
2.	Интенсивность ЧР в локальном месте	N , шт/с	0,066	0,066-0,23	0,23-0,7	>0,7
3.	Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение)	U_m , кВ	3,3	2,6	1,9	1,4

• Интенсивность – это сумма ЧР в локальном месте, деленная на число циклов измерения для каждой фазы приведенная к одной секунде. На гистограммах показана

сумма ЧР в локальных местах фаз. Этот параметр приводится в таблице нормируемых параметров с максимальным количеством ЧР по всем трем фазам. В качестве базового выбрано время всего процесса, равного в OWTS 8,2 секунды.

Опыт применения нормативов технического состояния изоляции показал их высокую эффективность. Вместе с тем было установлено, что нормативы несколько завышены. Так, например, область предельного риска исключает дальнейшую эксплуатацию линий без ремонта и именно это отмечалось в протоколе диагностических испытаний ООО «ТестСервис». Это означало, что при таком заключении о техническом состоянии линий их выход из строя возможен в любое ближайшее время.

Однако на практике не редки были случаи, когда линии, по техническому состоянию находящиеся в предельной области риска, продолжала исправно работать еще в течение нескольких лет. Предварительные дополнительные исследования имеющихся результатов диагностических испытаний показали, что зависимость количества разрядов за единицу времени от их амплитудных значений представляет собой выпуклую кривую. Рекомендуемые критерии оценки технического состояния линий располагаются на этой кривой слева от максимума. Амплитуда кривой соответствует приблизительно 30000-45000 пК, что более чем в три раза превышает предельное значение, приведенное в нормативах.

После достижения амплитудного значения зависимости количества разрядов за единицу времени от их амплитудных значений, количество разрядов уменьшается, а их амплитуда продолжает расти. Таким образом, если в результате измерений обнаруживаются импульсы разрядов большой величины, но с малой интенсивностью, то велика опасность скорого пробоя изоляции.

Следовательно, приведенные в данной работе нормативы оценки технического состояния следует считать обоснованными и дающими время для принятия решений по ремонту линий. Т.е. эти нормативы не следует считать предельными или граничными, по аналогии с результатами испытаний повышенным напряжением. В этом принципиальное отличие анализа результатов диагностики от анализа привычных испытаний повышенным напряжением.

Хорошим критерием по оценке технического состояния является напряжение возникновения разрядов. Если это напряжение меньше амплитуды фазного напряжения в нормальном режиме работы линии, т.е. без короткого замыкания какой либо фазы, то ситуация является уже серьезной. Учитывая то обстоятельство, что российские линии среднего напряжения имеют изолированную нейтраль, то при коротких замыканиях одной из фаз две другие попадают под линейное напряжение. Этот режим работы допускается в течение нескольких часов нашими стандартами. Поэтому в ООО «ТестСервис» линии среднего напряжения анализируются по разрядам вплоть до амплитуды линейного напряжения.

Известно, что нормативы оценки изоляции кабелей на заводах производителях существенно отличаются от нормативов, предлагаемых в этой работе. Предельное значение амплитуды частичных разрядов, принятое на кабельных заводах в России и у зарубежных производителей, не должно превышать 5пК. В то время как минимальная амплитуда в предлагаемых нормативах 1200пК.

Результаты измерений разрядов серьезным образом зависят от условий, в которых выполняются измерения. Испытательные станции заводов производителей имеют для этих целей экранированную камеру, а замеры выполняются при воздействии на изоляцию высокого напряжения промышленной частоты. Уровень помех в таких установках минимален, что и позволяет фиксировать разряды величиной 5пК и менее. Дополнительно принимаются меры для исключения разрядов на противоположном конце от точки измерения, с помощью масляных концевых муфт.

Диагностика эксплуатируемых кабельных линий производится в условиях действующего производства, при наличии помех уровнем до 500 пК. Поэтому схемы

измерения частичных разрядов в условиях действующих производств отличаются от схем, используемых на кабельных заводах. Кроме того напряжение воздействия на изоляцию установкой OWTS по частоте достигает несколько сот герц, а в коротких линиях до одного килогерца.

В ООО «ТестСервис» были выполнены расчеты с целью приведения рекомендуемых нормативов диагностики к нормативам кабельных заводов. Расчеты учитывали различие схем измерения и частот воздействия на изоляцию. Было установлено, что рекомендуемая норма 1200пк, принятая и в Италии, соответствует 5,3пК для установок на кабельных заводах. Уровень разрядов 1000пК, принятый в Германии, как предельный для линий без проблемных мест, после приведения соответствует 4,9пК. Т.е. предлагаемая для диагностики норма практически соответствует норме принятой на кабельных заводах.

Следует иметь в виду, что в Италии и Германии линии, имеющие уровень разрядов соответственно выше 1200 и 1000пК считаются проблемными. Это не означает, что при этом принимаются немедленные меры. Но при уровне разрядов более 10000пК, техническое состояние изоляции оценивается как критическое. Имеется и ряд промежуточных значений уровней разрядов по степени опасности. В соответствие с нормативами, рекомендуемыми для диагностики, уровень разрядов до 5000пК принимается в ООО «ТестСервис» как удовлетворительный. Такое различие подходов объясняется различным общим техническим состоянием сетей в России и зарубежом. В России практика эксплуатации линий до их предельного технического состояния в настоящее время является повсеместной.

Обслуживание и ремонт силовых кабельных линий по их действительному техническому состоянию, определяемому диагностикой, ведет к общему снижению затрат на обслуживание. Это позволяет снизить себестоимость основного производства предприятий. Но одновременно такая технология технического обслуживания вступает в противоречие с интересами сервисных компаний и служб главного энергетика предприятий, поскольку ведет к сокращению финансирования этих производств. Поэтому экономические интересы основного производства предприятий и диагностических подразделений практически всегда не совпадают с интересами сервисных компаний и служб главного энергетика.