

В 2017 г. статьи Л. Г. Сидельникова о диагностике и определении ресурса кабельных линий по уровню частичных разрядов публиковались в каждом номере «Новостей ЭлектроТехники».

Продолжаем этот цикл статей материалом об особенностях диагностики частичных разрядов в кабельных линиях с бумажно-масляной изоляцией. Автор предлагает методику оценки технического состояния и восстановления ресурса этих линий.

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ С БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Контроль частичных разрядов

Контроль технического состояния кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) методом измерения частичных разрядов (ЧР) – один из самых эффективных. Вместе с тем применение этого метода имеет здесь ряд особенностей. Так, в отличие от изоляции из сшитого полиэтилена, ЧР в БМИ могут мигрировать по длине линии, исчезая в местах их первоначального возникновения. Явление исчезновения ЧР называют эффектом самозалечивания проблемных мест. Физика возникновения ЧР в этой изоляции аналогична разрядам в сшитом полиэтилене.

МИГРАЦИЯ ЧР

БМИ имеет слоистую структуру с пропиточным составом между слоями. ЧР в местах неоднородностей приводят к образованию газовых пузырьков аналогично процессам в масле силовых трансформаторов. Газовые образования могут возникать также из-за утечки пропиточного состава в концевых и соединительных муфтах линий, создавая разрывы пропиточного состава. В любом случае, независимо от причин возникновения, газовые образования становятся в последующем причиной возникновения ЧР.

Газ может раствориться в пропиточном составе, изменяя его диэлектрические свойства. При этом освободившиеся пустоты заполняются пропиточным составом. ЧР в этих местах могут не исчезнуть совсем, а лишь существенно снизиться по величине и интенсивности. Это один возможный вариант самозалечивания проблемных мест.

В других случаях поляризованные пузырьки газа могут перемещаться по длине линии под действием перепада давления и электромагнитных сил. При этом ЧР с большим уровнем и интенсивностью исчезают в первоначальном месте, но появляются в другом. Миграция разрядов может достигать десятков метров. При длительном воздействии ЧР на бумажно-масляную изоляцию линий на регистрируемых участках фиксируются разряды различной величины и интенсивности на участках большой протяженности. По сути, это участки с деградированными диэлектрическими характеристиками. Миграция ЧР затрудняет оценку технического состояния изоляции и часто не позволяет надежно локализовать проблемные места.

Если допустить, что начальные характеристики изоляции кабелей высокие, то появление ЧР однозначно связано с качеством изготовления концевых и соединительных муфт. Это обстоятельство облегчает локализацию начального положения проблемных мест по регистрируемым разрядам. Если устранение ЧР по каким-либо причинам затягивается, то из-за миграции разрядов это приводит к деградации изоляции на больших расстояниях и требует при ремонте выполнения кабельных вставок большой длины.

Таким образом, миграция ЧР приводит к деградации изоляции на больших расстояниях, снижая ресурс линий. При этом в определенные отрезки времени уровень ЧР и их интенсивность могут и уменьшаться, создавая впечатление удовлетворительного технического состояния линии. Такому заключению способствует и большой проектный запас электрической прочности изоляции.



Леонид Сидельников,
к.т.н., ООО «ТестСервис»,
г. Пермь

Пробои изоляции возможны по ряду дополнительных причин, таких как повреждение и напряжения изоляции из-за внешних механических воздействий, сезонных подвижек почвы, сезонной высокой влажности и т.п.

Разряды в БМИ возможны не только в местах их первоначального возникновения (как правило, в муфтах), но и в других местах кабеля, изначально имевших хорошие диэлектрические характеристики. Нередки случаи, когда пробой изоляции происходит не в проблемном месте, указанном при диагностике, а совсем в другом. Это часто становится основанием для претензий в адрес диагностов. В связи с этим возникла необходимость оценки технического состояния КЛ с БМИ с учетом миграции разрядов.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КЛ С БМИ

Исключив из рассмотрения другие причины повреждения изоляции и принимая во внимание в качестве дополнительного фактора оценки технического состояния КЛ с БМИ только влияние миграции ЧР, можно рассматривать коэффициент деградации изоляции:

$$k_{\text{дегр}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l_0}, \quad (1)$$

где l_0 – длина линии; l_i – длина i -го участка со сниженными диэлектрическими характеристиками из-за влияния ЧР в результате миграции.

В общем случае из-за разной скорости течения процесса (физического времени) в локальных местах коэффициент деградации является нелинейной функцией:

$$k_{\text{дегр}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n l_i(t_i)}{l_0}. \quad (2)$$

Здесь t – физическое время процесса деградации изоляции; t_i – физическое время деградации изоляции i -го участка линии.

Оценка технического состояния КЛ с БМИ выполняется на основании нормативов, приведенных в табл. 1 и 2. В этих таблицах заключение, характеризующее техническое состояние КЛ после тестирования, формируется по наихудшему показателю. Интенсивность n – это сумма ЧР в локальном месте, деленная на число циклов измерения для каждой фазы, приведенная к одной секунде. На гистограммах графически изображается 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 измерения для OWTS, равное 0,82 с. Нормативы в табл. 1, 2 справедливы для локальных мест возникновения ЧР на момент выполнения диагностических испытаний по технологии OWTS.

Используя выражение (2), можно определить степень деградации изоляции не только для линии в целом, но и для каждого локального места ЧР, а на основании нормативов, приведенных

Нормируемые параметры ЧР для оценки состояния бумажно-масляной изоляции КЛ 6–35 кВ

Таблица 1 •

Максимальная величина ЧР в локальном месте (Q), пКл	Интенсивность ЧР в локальном месте (n), шт./с	Состояние БМИ	Рекомендации
<1200	<0,25	Нормальное	Диагностика через 5 лет
1200–7500	0,25–0,5	С отклонениями (малый риск пробоя)	Диагностика в течение года
7500–15000	0,5–1,5	Ухудшенное (есть риск пробоя)	Ремонт в течение года
> 15000	>1,5	Предаварийное (предельный риск)	Вывод из эксплуатации, ремонт

Нормативы по напряжению возникновения ЧР для КЛ 6–35 кВ с БМИ

Таблица 2 •

Напряжение возникновения ЧР (амплитудное значение), U_m , кВ	Номинальное напряжение, кВ				Состояние БМИ	Рекомендации
	6	10	20	35		
	8,2	12,5	28	49	Нормальное	Диагностика через 5 лет
	5,9–8,2	8,5–12,5	17–28	29–49	С отклонениями (малый риск пробоя)	Диагностика в течение года
	3,2–5,9	4,5–8,5	10–17	15–29	Ухудшенное (есть риск пробоя)	Ремонт в течение года
	<3,2	<4,5	<10	<15	Предаварийное (предельный риск)	Вывод из эксплуатации, ремонт

в табл. 1, 2, оценить степень опасности проблемных мест. Кроме того, коэффициент деградации изоляции позволяет определить затраты на восстановление линий до нормируемых значений параметров.

Очевидно, что во времени коэффициент деградации изоляции будет изменяться от 0 до 1. В итоге, при отказе от ремонтов, по всей протяженности линии будут присутствовать ЧР различной степени опасности. До этого дело может и не дойти по причине досрочного пробоя изоляции и необязательно в месте, указанном на момент диагностики. Поэтому соблюдение рекомендаций (табл. 1, 2) по срокам принятия решений имеет практическое значение. Ориентируясь на величину коэффициента $k_{дегр(t)}$ и нормативы, можно сделать вывод о целесообразности выполнения ремонтов либо о полной замене линии.

Пример

На рис.1 приведен пример регистрограммы по результатам диагностических испытаний линии с БМИ длиной 1375 м на напряжение 6 кВ. По результатам обследования линии аппаратурой OWTS техническое состояние изоляции на отрезках 1030–1072 м и 930–956 м от точки измерения в соответствии с нормативами находится в области риска. Кроме того, здесь зафиксированы ЧР значительной интенсивности. На отрезке 500–554 м возможно развитие дефектов изоляции.

Таким образом, в линии есть три участка со сниженными диэлектрическими характеристиками: l_1 , l_2 и l_3 длиной соответственно 42, 26 и 54 м. Отсюда $k_{дегр1} = 0,0305$, $k_{дегр2} = 0,0189$, $k_{дегр3} = 0,0393$. Интегрально $k_{дегр} = 0,0887$, т. е. около 9% длины КЛ имеет сниженные диэлектрические характеристики. Здесь нетрудно посчитать затраты на ремонт линии.

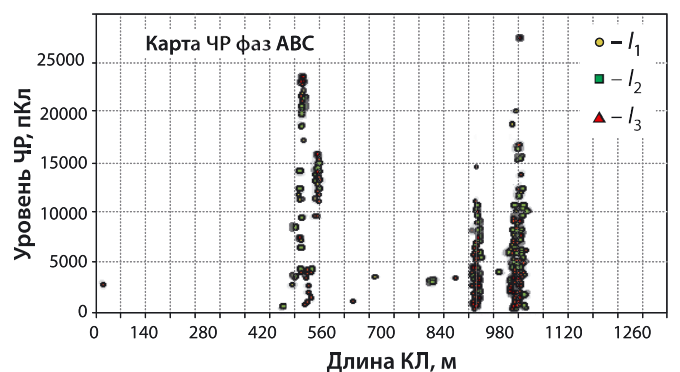
Указанные проблемные участки линии рекомендуется заменить. Затягивание сроков принятия решения о ремонте увеличит затраты вследствие миграции ЧР.

РЕСУРС ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИНИИ

Ресурс эксплуатации линий с БМИ может быть определен по методике, изложенной ранее [1]. На рис. 2 изображен формальный нейрон без учета миграции ЧР. На этом рисунке x_1 соответствует величине разряда Q, а x_2 интенсивности n.

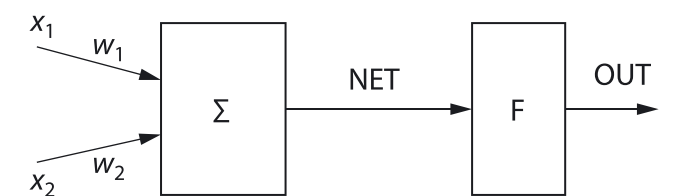
Регистрограмма ЧР в КЛ с БМИ

Рис. 1 •



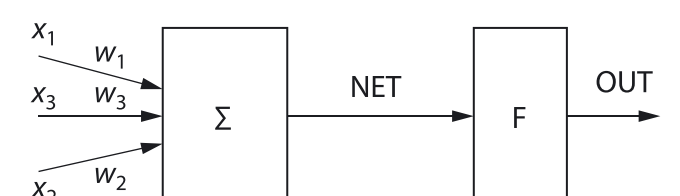
Формальный нейрон

Рис. 2 •



Формальный нейрон с учетом миграции ЧР

Рис. 3 •



• Таблица 3. Граничные значения ЧР и их интенсивности

n	0	0,25	0,5	1,5
Q	0	1200	7500	15000
$Q \cdot n$	0	300	3750	22500

• Таблица 4. Синхронное изменение параметров

Q , пКл	0	1200	7217,1	10126,3	11896,1	13064,1	13892,6	14510,9	15000
n , шт./с	0	0,25	0,481	0,656	0,825	0,994	1,163	1,332	1,5
$Q \cdot n$	0	300	3471,4	6642,8	9814,3	12985,7	16157,0	19328,6	22500

• Таблица 5. Расчет остаточного ресурса КЛ с БМИ

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_i \cdot n_i$	0	300	3471,4	6642,8	9814,3	12985,7	16157,1	19328,6	22500
Без учета миграции ЧР: $NET = 6,666 \cdot 10^{-5}Q + 0,666 \cdot n$; $k = 1,1$; $t_0 = 30$; $OUT = k \cdot e^{-NET}$; $t_{ост} = t_0 \cdot OUT$									
Q_i , пКл	0	1200	7217,1	10126,3	11896,1	13064,1	13892,6	14510,9	15000
n , шт./с	0	0,25	0,481	0,656	0,825	0,994	1,163	1,332	1,5
NET	0	0,2465	0,8013	1,1119	1,3424	1,5330	1,7005	1,8541	1,998
OUT	1,1	0,8596	0,4936	0,3618	0,2873	0,2375	0,2008	0,1722	0,1491
Остаточный ресурс, $t_{ост}$, лет	33	25,9	14,8	10,8	8,6	7,1	6,0	5,2	4,47
С учетом миграции ЧР: $NET = 6,666 \cdot 10^{-5}Q + 0,666 \cdot n + k_{дер}$									
$k_{дер}$	0	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1,0
NET	0	0,371	1,0513	1,4869	1,8424	2,158	2,450	2,729	2,998
OUT	1,1	0,7590	0,3844	0,2486	0,1743	0,1271	0,0949	0,0718	0,0548
Остаточный ресурс, $t_{ост}$, лет	33	22,77	11,53	7,46	5,23	3,81	2,85	2,15	1,64

► Нейрон состоит из взвешенного сумматора Σ и нелинейного элемента активатора F . Функционирование нейрона описывается следующими формулами

$$NET = \sum_i x_i w_i, \quad (3)$$

$$OUT = F(NET - \theta), \quad (4)$$

где x_i – входные параметры или совокупность входных сигналов нейрона, образующих вектор X ; w_i – весовые коэффициенты, образующие вектор W ; NET – взвешенная сумма входных сигналов, являющаяся входным сигналом нелинейного элемента F ; F – нелинейная функция или функция активации; θ – пороговый уровень нейрона.

Пусть:

$$x_1 w_1 = Q \cdot \frac{1}{Q_{\max}}, \quad (5)$$

$$x_2 w_2 = n \cdot \frac{1}{n_{\max}}, \quad (6)$$

где параметры $x_1 = Q$; $x_2 = n$, а весовые коэффициенты $w_1 = \frac{1}{Q_{\max}}$ и $w_2 = \frac{1}{n_{\max}}$. Для линий с бумажно-масляной изоляцией, с учетом значений параметров в табл. 1:

$$w_1 = \frac{1}{Q_{\max}} = \frac{1}{15000} = 6,666 \cdot 10^{-5}, \quad (7)$$

$$w_2 = \frac{1}{n_{\max}} = \frac{1}{1,5} = 0,666.$$

Таким образом:

$$x_1 w_1 = 6,666 \cdot 10^{-5} Q, \quad (8)$$

$$x_2 w_2 = 0,666 \cdot n. \quad (9)$$

Следовательно:

$$NET = 6,666 \cdot 10^{-5} Q + 0,666 \cdot n. \quad (10)$$

С учетом миграции разрядов в формальный нейрон добавляется еще одна переменная $x_3 = I_i$ (рис. 3). Весовой коэффициент w_3 (рис. 3) в свою очередь определяется как $1/l_0$, где l_0 – длина анализируемой линии. Тогда:

$$NET = 6,666 \cdot 10^{-5} Q + 0,666 \cdot n + k_{дер}, \quad (11)$$

$$k_{дер} = \frac{1}{l_0} \cdot I_i.$$

В выражении (11) значения Q , n и I_i соответствуют конкретному i -му проблемному месту. Таким образом, вычисляя NET для каждого проблемного места линии, можно оценить влияние каждого из них.

Если функция активации $F = e^{-NET}$, то при значении ресурса линии $t_0 = 30$ лет остаточный ресурс линии:

$$t_{ост} = t_0 \cdot OUT = 30 \cdot OUT \text{ [лет]}. \quad (12)$$

В табл. 3 приведены значения n , Q , $Q \cdot n$, соответствующие граничным значениям параметров (табл. 1), а на рис. 4 – график зависимости n от значений $Q \cdot n$.

Текущие значения Q и n можно рассчитать, аппроксимируя зависимость $n = \varphi(Q \cdot n)$ при изменении Q от 0 до 15000 отрезками прямых линий:

$$\begin{aligned} n(0-1) &= 8,33(Q \cdot n) \cdot 10^{-4}; \\ n(1-2) &= 0,23 + 0,724(Q \cdot n) \cdot 10^{-4}; \\ n(2-3) &= 0,302 + 0,533(Q \cdot n) \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \quad (13)$$

При синхронном изменении Q и n получим значения, приведенные в табл. 4. На основании данных в табл. 4 можно рассчитать ресурс линии (табл. 5).

Графики на рис. 5 соответствуют синхронному изменению параметров Q , n и $k_{\text{дегр}}$ в сторону их увеличения. В реальности такой синхронности не наблюдается из-за случайного изменения параметров, зависящего от множества причин. Снижение ресурса относительно нормируемого значения 30 лет можно определить по результатам конкретной диагностики.

Тренд снижения ресурса можно построить по результатам минимум двух диагностических испытаний, выполненных, например, с периодичностью один год. По результатам одной диагностики также можно определить направление развития процесса, рассчитав предварительно поле векторного потенциала событий. В любом случае построение тренда не должно выходить за предел пяти лет, поскольку достоверность прогноза на более длительный период сомнительна.

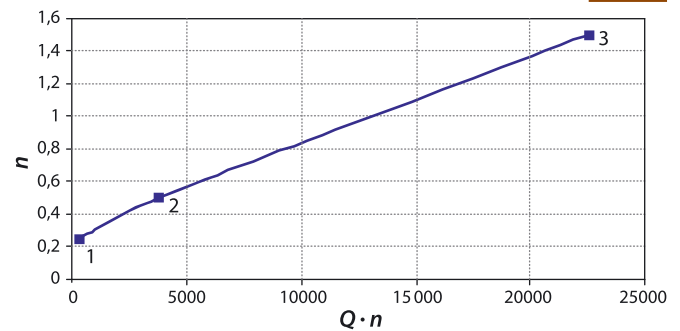
Реальный ресурс эксплуатации линий заранее не известен. Но независимо от его величины определить его снижение в процентах относительного значения, равного единице, вполне возможно.

Для планирования развития сетей необходимо знать, на что можно рассчитывать, эксплуатируя кабельные сети. Известно, что поставленная цель может быть достигнута при наличии обратной отрицательной связи о техническом состоянии линий. Это возможно при отлаженной системе контроля технического состояния объектов и принятия своевременных мер по восстановлению технических параметров кабельного хозяйства.

Описанная методика применима и для шитого полиэтилена, в котором расширение зоны изоляции с изменившимися диэлектрическими характеристиками связано с ростом водных и электрических трингов. В результате изменяется электрическая емкость линии. Поэтому степень деградации изоляции можно оценить по диэлектрической проницаемос-

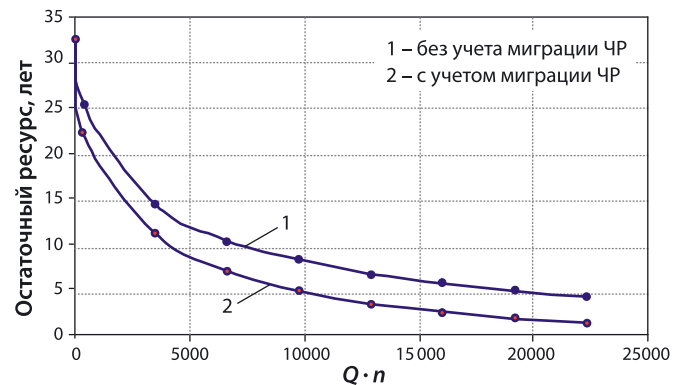
Зависимость интенсивности ЧР от значений $Q \cdot n$

Рис. 4 •



Изменение остаточного ресурса КЛ с бумажно-масляной изоляцией

Рис. 5 •



ти, измерив электрическую емкость на резонансной частоте и сравнив ее со значением на этапе ввода в эксплуатацию или с результатами следующей диагностики через некоторый промежуток времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельников Л. Оценка технического состояния КЛ со СПЭ-изоляцией. Детализация процесса // Новости ЭлектроТехники. 2017. № 5(107)–6(108). С. 40–42. ■

КОММЕНТАРИЙ

Алексей Таджибаев,
д.т.н., профессор, ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»

Анализ должен опираться на реальные процессы

В российских кабельных сетях, несмотря на широкое внедрение кабелей с полимерной изоляцией, общий процент кабелей с маслопропитанной изоляцией значителен и требует адекватных подходов к оценке технического состояния. Поэтому исследование, проведенное Л.Г. Сидельниковым, вполне актуально.

Техническое состояние кабелей с бумажно-масляной изоляцией, как правило, связано с двумя процессами:

- с разрушением межмолекулярных связей в целлюлозной или иной твердой составляющей маслопропитанной изоляции;
- с возникновением и развитием локального дефекта, обусловленного неоднородностью как в целлюлозной, так и в масляной составляющей.

При частичном разряде в месте его возникновения выделяется достаточно энергии для разрушения целлюлозной составляющей изоляции кабеля, что приводит к изменению термической и механической прочности изоляционной конструкции. То есть частичный разряд, приводящий к изменению технического состояния кабеля в локальном месте, как правило, влияет на старение изоляции в целом. Таким образом, при оценке технического состояния необходимо учитывать

два указанных физико-химических процесса, влияющих на разрушение изоляции.

Введенный автором материала термин «миграция разрядов», по моему мнению, неудачный, так как возникновение частичного разряда в новом месте не является продолжением предыдущего разрядного процесса, он возникает самостоятельно, под влиянием характерных для этого места факторов.

Усиление разрядных процессов в пределах нескольких метров или десятков метров определяется, как правило, пересечением кабельной трассы с другими коммуникациями и воздействием присущих этому месту свойств грунта, влаги и др.

Изменения напряженности электрического поля, которые могли бы быть двигателем перемещения разрядных процессов вдоль кабеля, незначительны.

Несмотря на указанные замечания, в общем я поддерживаю автора материала, так как в современных условиях всё более широко применяются информационные технологии, что, собственно, и отражено в статье. Но новые технологии оценки технического состояния кабелей, в том числе на основе анализа частичных разрядов, должны опираться на реальные процессы, происходящие в конструктивных элементах кабеля. ■