

КАБЕЛИ НА СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Напряжение возникновения и гашения частичных разрядов в кабелях на среднее напряжение

Л.А. Ковригин, д-р техн. наук, Пермский государственный технический университет;

Л.Г. Сидельников, канд. техн. наук;

Д.В. Мелехин, ООО «ТестСервис», г. Пермь

При исследовании частичных разрядов (ЧР) в изоляции считалось достаточным определения напряжения порога ионизации, так как некоторые изоляционные материалы настолько чувствительны к внутренним разрядам, что в них вообще нельзя допустить разрядов [1]. Срок службы изоляции, в которой допускаются частичные разряды, зависит от отношения рабочего напряжения к напряжению порога ионизации. Обычно порог ионизации определяли по возрастанию тангенса угла диэлектрических потерь [2].

В настоящее время система OWTS (Oscillating Wave Test System) позволяет определять напряжение зажигания и гашения частичных разрядов в кабельных линиях с использованием затухающей колебательной волны. Такая волна создается путем разряда кабеля на катушку индуктивности (рис. 1).

Вначале испытуемый кабель отключается с двух сторон. Затем с одной стороны к токопроводящей жиле кабеля подключается катушка индуктивности L и ЭВМ. От высоковольтного источника постоянного напряжения через ограничительное

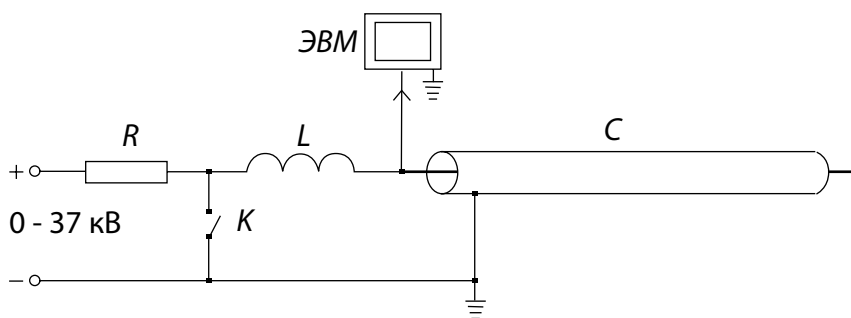
сопротивление R заряжается емкость кабеля C до некоторого напряжения. После замыкания высоковольтного электронного ключа K образуется контур LC , колебания в котором затухают из-за диэлектрических потерь в изоляции, активного сопротивления катушки и высоковольтного электронного ключа. Зарядное напряжение повышают на определенную ступень и повторяют измерение. При таком пошаговом повышении напряжения будет определено напряжение зажигания частичных разрядов, чем меньше шаг, тем точнее определяется напряжение.

Напряжение гашения частичных разрядов определяется по другой методике. На рис. 2 показана затухающая синусоида и частичные разряды. В некоторый момент времени, которое соответствует напряжению U_r , частичные разряды прекращаются. Это напряжение есть напряжению гашения частичных разрядов.

Многочисленные измерения системой OWTS кабельных линий в г. Перми и Пермской области, позволили построить кривые вероятности возникновения и гашения частичных разрядов. Статистическая обработка эксперимен-

Рис. 1. Схема создания затухающей колебательной волны в кабельной линии:

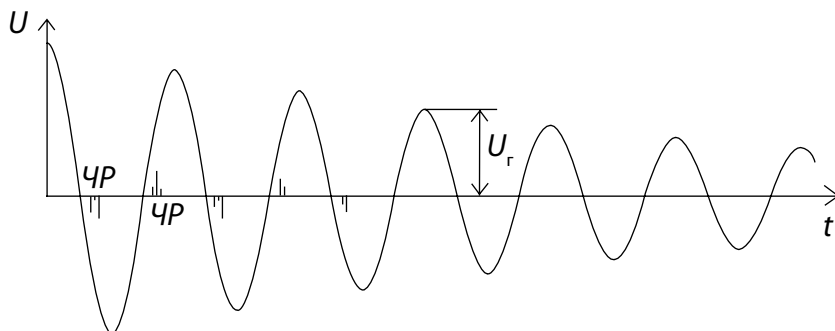
R — ограничительное сопротивление;
 K — высоковольтный электронный ключ;
 L — катушка индуктивности;
 C — емкость кабельной линии.



КАБЕЛИ НА СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Рис. 2. Определение напряжения гашения частичных разрядов:

ЧР — частичные разряды;

 U_r — напряжения гашения ЧР.

тальных результатов производилась по следующим формулам [3].

Среднее арифметическое значение $\bar{x}$, дисперсия D и среднее квадратичное отклонение S :

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

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

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

где n — число измерений, x_i — значения измеряемых величин.

Асимметрия A и эксцесс E :

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

$$E = \frac{1}{S^4(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4. \quad (2)$$

Собственная дисперсия асимметрии D_A и эксцесса D_E :

$$D_A = \frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)},$$

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

Было исследовано 106 трехфазных линий (318 измерений) с кабелями с

пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 6 кВ (ААШв), 70 линий с кабелями с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ (ААШв, АСБ), 11 линий с кабелями с поливинилхлоридной изоляцией 6 кВ (ВВГ) и 10 линий с кабелями со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 35 кВ (АПВнг). На рис. 3 представлены гистограмма и плотность распределения напряжения (амплитудные значения) возникновения и гашения частичных разрядов в линиях с кабелями с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение

6 кВ. В табл. 1 представлены результаты статистической обработки измерений напряжения возникновения и гашения частичных, из которой видно, что среднее значение напряжения возникновения частичных разрядов (5,8 кВ) больше, чем среднее значение напряжения гашения частичных разрядов (4,99 кВ). Это обусловлено тем, что в пропиточном составе в месте ЧР возникает полость, которая затекает после разряда.

Согласно критерию Чебышева можно принять гипотезу о нормальности распределения при выполнении соотношений:

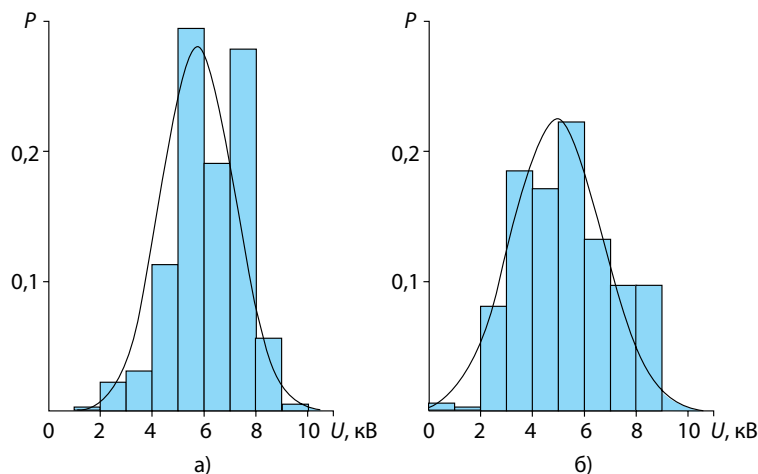
$$|A| \leq 3\sqrt{D_A}, \quad |E| \leq 5\sqrt{D_E}. \quad (4)$$

Учитывая, что $3\sqrt{D_A} = 0,41$ и $5\sqrt{D_E} = 1,34$, получим:

1) возникновение разряда
 $A = 0,42 > 0,41 = 3\sqrt{D_A}$ (по асимметрии закон отличается от нормального) и $E = 0,11 < 1,34 = 5\sqrt{D_E}$ (по эксцессу закон нормальный);

2) гашение разряда
 $A = 0,20 < 0,41 = 3\sqrt{D_A}$ (по асимметрии закон нормальный) и $E = 0,80 < 1,34 = 5\sqrt{D_E}$ (по эксцессу закон нормальный).

Рис. 3. Гистограмма и плотность распределения напряжения (амплитудное значение) возникновения а) и гашения б) частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 6 кВ



КАБЕЛИ НА СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Табл. 1. Результаты статистической обработки измерений напряжения (амплитудное значение) возникновения и гашения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 6 кВ (кабели с пропитанной бумажной изоляцией)

№ п/п	Параметр	Обозначение	Возникновение ЧР	Гашение ЧР
1	Число измерений	n	318	318
2	Среднее арифметическое	$\bar{x}$, кВ	5,80	4,99
3	Дисперсия	D	2,01	3,10
4	Среднее квадратичное отклонение	S, кВ	1,42	1,76
5	Асимметрия	A	0,42	-0,20
6	Экссесс	E	-0,11	-0,80
7	Собственная дисперсия асимметрии	DA	0,0185	0,0185
8	Собственная дисперсия эксцесса	DE	0,0720	0,0720
9	$3\sqrt{DA}$		0,41	0,41
10	$5\sqrt{DE}$		1,34	1,34
11	Нормальный закон распределения	$ A \leq 3\sqrt{DA}$	0,42 > 0,41; нет	0,2 < 0,41; да
12	Нормальный закон распределения	$ E \leq 5\sqrt{DE}$	0,11 < 1,34; да	0,8 < 1,34; да

Отклонение закона распределения напряжения возникновения частичных разрядов от нормального обусловлено тем, что подъем напряжения осуществляется не плавно, а ступенями через 0,5 кВ, так как при меньших ступенях резко возрастает

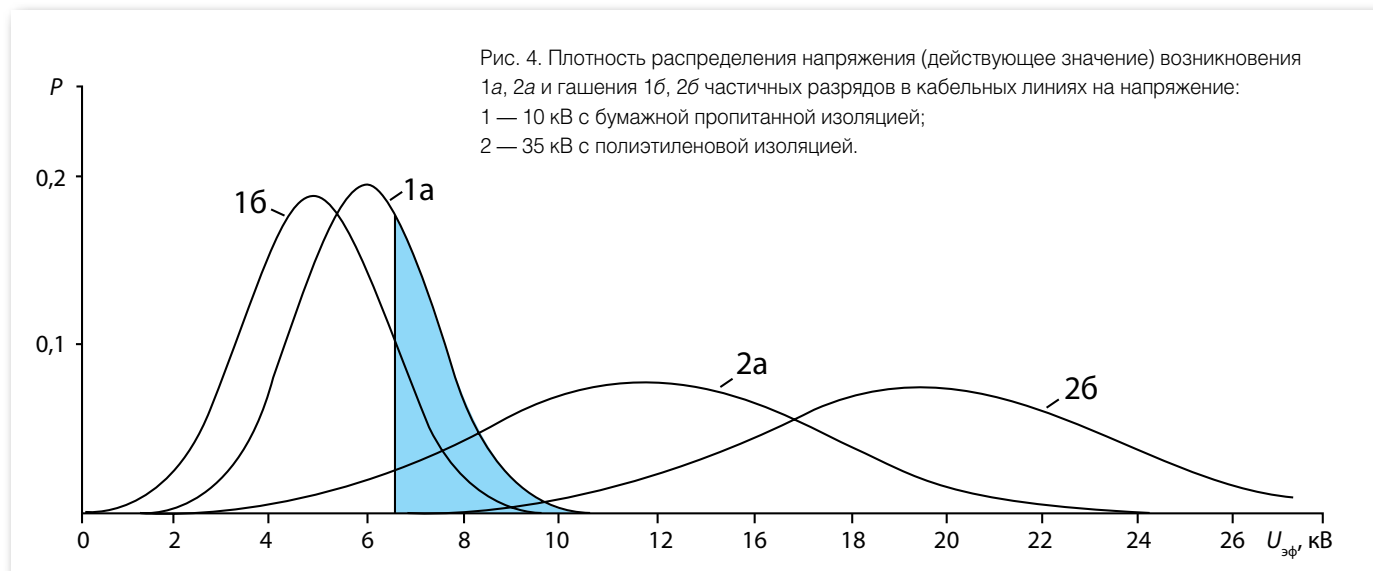
трудоемкость измерения. На затухающей синусоиде напряжение гашения ЧР регистрируется более четко за одно измерение.

Для практических целей удобнее пользоваться эффективным напряжением. На рис. 4 представлена кривая

распределения напряжения возникновения и гашения частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией и 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией.

Как отмечалось выше, у кабелей с бумажной пропитанной изоляцией напряжения гашения частичных разрядов ниже, чем напряжения возникновения частичных разрядов; у кабелей с полиэтиленовой изоляцией наблюдается обратная зависимость: напряжения гашения частичных разрядов выше, чем напряжение возникновения частичных разрядов. Это обусловлено тем, что в полиэтилене, как материале имеющем, высокое удельное объемное сопротивление, накапливаются объемные заряды, особенно вблизи неоднородностей, что снижает напряжение на неоднородностях и, следовательно, повышает порог гашения ЧР.

Класс напряжения (U_n) это номинальное линейное действующее напряжение на приемнике электроэнергии, на генераторе напряжение в 1,15 выше ($U_{\text{раб.мах}} = 1,15 \times U_n$ — наибольшее рабочее напряжение), за счет падения напряжения в линии.



КАБЕЛИ НА СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Например, со стороны приемника электроэнергии на изоляцию кабеля на линейное напряжение $U_n = 10$ кВ в нормальном режиме работы, т.е. без смещения нейтрали, воздействует фазное напряжение $U_\phi = 10/\sqrt{3} = 5,8$ кВ; со стороны генератора $1,15 \cdot 10/\sqrt{3} = 6,6$ кВ. В России сети от 3 до 35 кВ работают с изолированной нейтралью. В таких сетях при однофазном замыкании на землю не происходит отключение линии, так как не возникает короткого замыкания, однако на неповрежденных фазах напряжение возрастает до линейного или, более точно, до $10 \times 1,15 = 11,5$ кВ.

На рис. 4 заштрихованной областью показана доля кабельных линий с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ, в которых не возникают ЧР при фазном наибольшем рабочем напряжении 6,6 кВ. При однофазном замыкании на землю, когда напряжение на неповрежденных фазах возрастает до 11,5 кВ, во всех кабелях в изоляции идут процессы ионизации.

Для кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 35 кВ наибольшее рабочее действующее напряжение равно $1,15 \cdot 35/\sqrt{3} = 23$ кВ. На рис. 4 видно, что кривая 2а лежит ниже этого предела, т.е. во всех кабелях при нормальной работе есть ЧР.

На рис. 5 представлена плотность распределения напряжения (действующее значение) возникновения 1 и гашения 2 частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 6 кВ с поливинилхлоридной изоляцией. Так же как и у кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, напряжение гашения частичных разрядов ниже, чем напряжения возникновения частичных разрядов. Это обусловлено

низким удельным объемным сопротивлением изоляции.

Разница между напряжением возникновения и гашения частичных разрядов у кабелей с поливинилхлоридной изоляцией меньше, чем у кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, так как изоляция твердая и пустоты не изменяют геометрической формы.

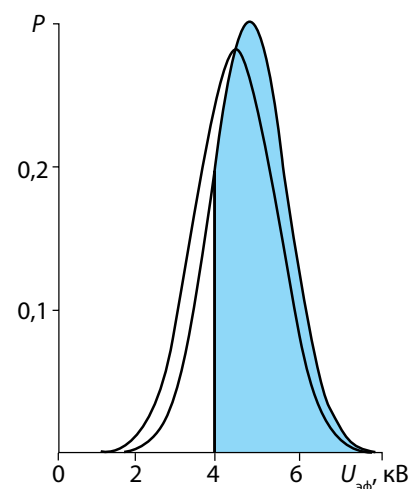
На рис. 5 заштрихованной областью показана доля кабельных линий с поливинилхлоридной изоляцией на напряжение 6 кВ (фазное наибольшее рабочее действующее напряжение $1,15 \cdot 6/\sqrt{3} = 4,0$ кВ), где нет частичных разрядов. Сравнивая рис. 4 и 5, можно сделать вывод, что вероятность возникновения частичных разрядов у кабелей с поливинилхлоридной изоляцией меньше, чем у других. Однако кабели с поливинилхлоридной изоляцией можно эксплуатировать только на напряжение до 6 кВ из-за больших диэлектрических потерь.

Выводы

1. В кабелях с пропитанной бумажной изоляцией напряжение возникновения частичных разрядов больше, чем напряжение их гашения из-за образования полостей в пропиточном составе в месте действия частичного разряда. После прекращения ЧР полость заполняется пропиточным составом.

2. В кабелях с полиэтиленовой изоляцией напряжение возникновения частичных разрядов меньше, чем напряжение их гашения за счет поляризации диэлектрика, особенно около неоднородностей. Полиэтилен по отношению к бумажной пропитанной изоляции имеет намного большее удельное объемное электрическое сопротивление, поэтому объемный

Рис. 5. Плотность распределения напряжения (действующее значение) возникновения 1 и гашения 2 частичных разрядов в кабельных линиях на напряжение 6 кВ с поливинилхлоридной изоляцией



электрический заряд дольше сохраняется в изоляции.

3. Среди кабелей: с бумажной пропитанной, поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляцией, наибольший порог возникновения частичных разрядов имеют кабели с поливинилхлоридной изоляцией, но такие кабели можно применять на напряжение не более 6 кВ из-за больших диэлектрических потерь в изоляции.

Литература

1. Д. Вайда. Исследование повреждений изоляции. М.: Энергия, 1968. — 400 с.
2. С.Н. Койков, А.Н. Цикин. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. Л.: Энергия, 1968. — 185 с.
3. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике. М.: Наука, 1978. — 832 с.