

2. Разработанный электропривод может найти применение в самых различных установках при питании от аккумуляторной батареи напряжением 12...48 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование электрических машин: Учеб. пособ. для вузов / Под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
2. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина – М.: Энергия, 1980. – 486 с.
3. Гульков Г. И., Гульков А. Г., Шайби Р. Формирование тяговой характеристики бесконтактного двигателя постоянного тока // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 6. – С. 24–32.
4. Лебедев Н. И., Гандшу В. М., Явдошак Я. И. Вентильные электрические машины. – СПб.: Наука, 1996. – 252 с.
5. Лебедев А. Н. Характеристики тягового вентильного двигателя с постоянными магнитами при регулировании напряжением питания // Электромеханика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1989. – № 1. – С. 49–51.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 30.05.2002

УДК 621.313.314

СРОК СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ПОКРЫТЫХ ПРОВОДОВ ВЛП 10 кВ ПРИ КАСАНИИ ВЕТОК ДЕРЕВЬЕВ И ДРУГИХ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ПРЕДМЕТОВ

**Докт. техн. наук, проф. СТЕПАНЧУК К. Ф.,
кандидаты техн. наук, доценты КЛИМОВИЧ Г. С., КРАСЬКО А. С.**

Белорусский национальный технический университет

Применение на ВЛП 10 кВ изолированных, покрытых слоем полиэтилена проводов обеспечивает повышенную надежность и экономичность линий. Допускаются падение на провода деревьев, касание веток, что позволяет уменьшить ширину просек при прохождении ВЛ по лесным массивам, садам или населенным пунктам [1–3]. Такие провода выпускаются во многих странах, включая Финляндию, Россию и Республику Беларусь. В Беларуси завод «Белсельэлектросетьстрой» выпускает покрытый провод АСИ. В качестве токопроводящей жилы в нем используется стандартный сталеалюминиевый провод.

Основное внимание в стандартах и технических условиях уделяется электрическим характеристикам покрытия [2, 3]. При падении на провода деревьев, касании веток, что возможно из-за уменьшенной ширины просек, покрытие должно не допускать значительных токов утечки, выдерживать

приложенные напряжения и временные повышения напряжения. Поведение изоляции покрытых проводов при длительной эксплуатации в конкретных условиях определяет не только надежность, но и безопасность эксплуатации ВЛП. Поэтому были выполнены расчеты напряженности электрического поля в изолирующем покрытии проводов при нормальной работе ВЛП и в аварийных режимах. Как показали расчеты, максимальная напряженность на поверхности провода не превышает 2,5...4,5 кВ/см. Максимальное усиление поля за счет многопроволочного провода можно ожидать на поверхности проволоки провода минимального сечения (АС-35), и оно не должно превышать 1,35 по отношению к указанным выше значениям максимальной напряженности; максимальная напряженность поля в покрытии – не более 3 кВ/см для проводов такого диаметра; максимальная напряженность поля в воздушных включениях при рабочем напряжении ВЛП 10 кВ – не более 6 кВ/см. При возможных размерах воздушного включения критическая напряженность начала ионизации составляет 60...70 кВ/см. Таким образом, воздушные включения в покрытии могут пробиваться (ионизироваться с разрушением покрытия) при напряжениях, в десятки раз превышающих рабочее. Такие напряжения возникают только при атмосферных перенапряжениях.

При падении на провод дерева или касании веток система электродов представляет два цилиндра, расположенных на расстоянии δ друг от друга. Максимальная напряженность электрического поля в этом случае может быть рассчитана по соотношению [4]

$$E_{\max} = 0,45U / r \ln \frac{r + \delta}{r}, \quad (1)$$

где r – радиус провода; δ – толщина покрытия.

При наибольшем рабочем напряжении 12 кВ, радиусе проводов 0,5; 0,75; 1 см и толщине покрытия 2 мм максимальная напряженность составит при нормальной работе линии соответственно 18,2; 18 и 17 кВ/см, а при замыкании на землю – 32; 31 и 30 кВ/см. Приведенные расчеты показывают, что при падении на провод дерева и замыкании на землю с учетом усиления поля многопроволочного провода и наличия воздушных включений напряженность электрического поля в них достигает 60...80 кВ/см. При таких условиях возможны ионизационные процессы в воздушных включениях, что связано с разрушением изоляционного покрытия и представляет опасность для людей и животных. Поэтому время работы ВЛП в таких условиях должно быть ограничено. При атмосферных перенапряжениях в рассматриваемых случаях возможен пробой изоляции в середине пролета.

Для подтверждения теоретических расчетов было экспериментально исследовано поведение изоляционного покрытия проводов при попадании на ВЛП заземленного предмета (табл. 1). Опыты проводились на установке 120 кВ промышленной частоты. Испытательная установка представляла модель пролета линии. Длина пролета – 12 м. Покрытый провод закреплялся на изоляторах ШФ-20Г. На провод подавалось испытательное напряжение. Заземленные электроды накладывались через 1 м друг от друга и от изоляторов.

Результаты испытаний изоляции одиночного провода

U, кВ	Время до пробоя τ , с	Примечание
24	90; 1920; 4020; 4200	28 образцов выдержали время испытаний 30 ч без пробоя. Всего 32 образца
41	15; 16; 26; 60; 65; 75; 240; 390; 410; 510; 615; 890; 1140; 1400; 3900; 4470; 6800; 14900; 14960; 15320	Всего испытано 20 образцов
70	1; 1; 1; 1; 2; 2; 2; 2; 3; 3; 3; 3; 5; 6; 10; 12,5; 27; 30; 43; 62; 84; 85; 89	Всего испытано 26 образцов, из них 4 пробивались при подъеме напряжения

При напряжении 24 кВ у краев электродов наблюдался коронный разряд. После 30 ч выдержки под действием этого разряда поверхность изоляции на 3...3,5 см от электродов стала шероховатой. Все пробойи наблюдались непосредственно под электродами в местах дефектов покрытия. При напряжении 41 и особенно 70 кВ по поверхности изоляции происходили интенсивные скользящие разряды. При напряжении 41 кВ их длина достигала 10...15 см. Под действием разрядов поверхность разрушалась и темнела. При напряжении 70 кВ длина поверхностных разрядов достигала 50 см и больше. Можно предположить, что при напряжении 30...40 кВ меняется характер разрушения изоляции. До 41 кВ пробой, прежде всего, выявлял скрытые дефекты покрытия. При большем напряжении под действием поверхностных разрядов изоляция разрушалась. При напряжении 70 кВ этот процесс ускорялся. Поэтому в вольт-временной характеристике изоляции выделяют два участка.

На первом, в соответствии с методикой, описанной в [5], были выбраны следующие значения испытательных напряжений: $U_0 = 17$ кВ; $U_1 = 24$ кВ; $U_2 = 41$ кВ; $\kappa = 1,708$.

Вольт-временная характеристика рассчитывалась для средних значений по уравнению

$$\tau = T \left(\frac{U_0}{U(\tau) - U_0} \right)^m. \quad (2)$$

Постоянные T и m вычислялись по результатам эксперимента для напряжений 24 и 41 кВ. Для 24 кВ минимальный срок службы образца был принят $\tau_{\min} = 2000$ с как средний для четырех пробитых образцов. Остальные образцы выдержали без заметных повреждений 30 ч [-10^5 с]. Поэтому среднее значение срока службы образцов всей выборки было принято $\tau_{0,5} = 10^6$ с. Не совершая большой погрешности, при вероятности 0,8 его можно принять $\tau_{0,8} = 2 \cdot 10^6$ с (порядка 1 месяца).

Для 41 кВ пробой всех двадцати образцов произошел за время от 15 с до нескольких часов. Благодаря определенности ряда $\tau_{\min} = 15$ с; $\tau_{0,5} = 3310$ с; $\tau_{0,8} = 6000$ с

$$m = \frac{\lg(\tau_1 / \tau_2)}{\lg(k+1)} = \frac{\lg(10^6 / 3310)}{\lg(1,708+1)} = 5,73. \quad (3)$$

Постоянная T может быть подсчитана по данным статистической обработки как

$$T_1 = \frac{\tau_1^2}{\tau_2} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^m = \frac{(10^6)^2}{3310} \left(\frac{1,708-1}{1,708+1} \right)^{5,73} = 1,38 \cdot 10^5. \quad (4)$$

Результаты расчетов среднего срока службы (при вероятности пробоя 0,5) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость среднего срока службы образцов от приложенного напряжения

U , кВ	16,8	21,0	24,0	28,0	41,0	42,0	56,0	70,0
$\tau_{0,5}$, с	$1,4 \cdot 10^9$	$7,5 \cdot 10^6$	$0,98 \cdot 10^6$	$0,14 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$	262	50,4

Распределение вероятностей пробоя при различных напряжениях задается уравнением [5]

$$\tau_i = \tau_{\min} \left(\frac{U_1 - U_0}{U - U_0} \right)^m + (\tau_{0,5} - \tau_{\min}) \left(\frac{\ln[1 - F(\tau, U)]}{\ln 0,5} \right)^{\frac{1}{\delta}} \left(\frac{U_1 - U_0}{U - U_0} \right)^m, \quad (5)$$

где U – действующее напряжение, кВ; $F(\tau, U)$ – вероятность пробоя; остальные величины определены ранее: $\tau_{\min} = 2 \cdot 10^3$ с; $\tau_{0,5} = 10^6$ с; $U_0 = 14$ кВ; $U_1 = 24$ кВ.

Коэффициент δ рассчитывается по соотношению

$$\delta = \ln(\ln(1 - 0,8) / \ln(1 - 0,5)) / \ln \frac{\tau_{0,8} - \tau_{\min}}{\tau_{0,5} - \tau_{\min}}. \quad (6)$$

Для выборок 41 и 24 кВ получаем соответственно $\delta_1 = 1,41$ и $\delta_2 = 1,21$. Принимаем среднее значение $\delta = 1,31$.

После подстановки числовых значений получаем исходное уравнение

$$\tau_i = 2 \cdot 10^3 \left(\frac{10}{U - 14} \right)^{5,73} + 0,998 \cdot 10^6 \left(\frac{\ln[1 - F(\tau, U)]}{\ln 0,5} \right)^{\frac{1}{1,31}} \left(\frac{10}{U - 14} \right)^{5,73}$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Срок службы образца изоляции при заданных напряжении и вероятности пробоя

Вероятность $F(\tau, U)$	Срок службы образца τ , с, при напряжении U , кВ							
	16,8	21,0	24,0	28,0	41,0	42,0	56,0	70,0
0,001	$12,5 \cdot 10^6$	$65,7 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	28,7	23	2,3	0,4
0,01	$59,5 \cdot 10^6$	$0,3 \cdot 10^6$	$40,4 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^3$	136	110	11	2,1
0,1	$3,5 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$0,24 \cdot 10^6$	$0,03 \cdot 10^6$	798	647	63	12
0,2	$6,2 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^6$	$0,42 \cdot 10^6$	$0,06 \cdot 10^6$	1415	$1,1 \cdot 10^3$	113	22
0,5	$1,5 \cdot 10^9$	$7,7 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$0,15 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$	268	52
0,8	$2,8 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^6$	$0,28 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^3$	512	99
0,9	$3,7 \cdot 10^9$	$19,4 \cdot 10^6$	$8,5 \cdot 10^6$	$0,37 \cdot 10^6$	$8,4 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^3$	675	130
0,99	$6,3 \cdot 10^9$	$33,1 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^6$	$0,62 \cdot 10^6$	$14,3 \cdot 10^3$	$11,7 \cdot 10^3$	1150	221
0,999	$8,6 \cdot 10^9$	$45,2 \cdot 10^6$	$5,9 \cdot 10^6$	$0,85 \cdot 10^6$	$19,5 \cdot 10^3$	$16 \cdot 10^3$	1571	302

Для второго участка, когда разрушение вызывается в основном поверхностными разрядами, были выбраны следующие испытательные напряжения: $U_0 = 24$ кВ; $U_1 = 41$ кВ; $U_2 = 70$ кВ; $\kappa = 1,708$. Ход расчета тот же, что и для первого участка характеристики. Для $U_1 = 41$ кВ: $\tau_{\min} = 15$ с; $\tau_{0,5} = 3310$ с; $\tau_{0,8} = 6000$ с. Для $U_2 = 70$ кВ были получены следующие результаты: $\tau_{\min} = 0$ (таким значение было принято, потому что четыре образца из 26-ти были пробиты при подъеме напряжения); $\tau_{0,5} = 14,8$ с и $\tau_{0,8} = 30$ с; $m = 5,45$ и $T = 500$. Среднее значение срока службы образцов при заданном значении напряжения описывается следующим уравнением:

$$\tau = 500 \left(\frac{24}{U - 24} \right)^{5,45}$$

Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Зависимость среднего срока службы от приложенного напряжения

U , кВ	25	27	29	36	41	48	70	72
$\tau_{0,5}$, с	$1,7 \cdot 10^{10}$	$4,1 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^3$	500	14,4	11,7

По экспериментальным данным, приведенным в табл. 2 и 4, построены зависимости срока службы образцов от приложенного напряжения (рис. 1). Отчетливо видно, что при напряжении 41 кВ меняется характер зависимостей, что подтверждает изменение характера разрушения.

Распределение вероятностей пробоя при различных напряжениях задается уравнением (5). Коэффициент δ для данного массива составляет 1,3. Уравнение после подстановки числовых значений принимает следующий вид:

$$\tau_i = 14,8 \left(\frac{17}{U-24} \right)^{5,45} + 3295 \left(\frac{I_n(1-F(\tau_i U))}{I_n 0,5} \right)^{\frac{1}{1,3}} \left(\frac{17}{U-24} \right)^{5,45}$$

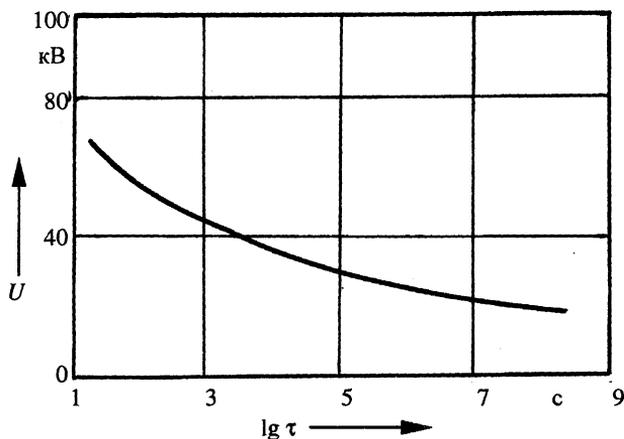


Рис. 1

Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Срок службы образца изоляции провода при заданных напряжении и вероятности пробоя

Вероятность пробоя, $F(\tau, U)$	Срок службы образца τ , с, при напряжении U , кВ							
	28,8	36	41	48	70	72	96	120
0,001	$35,7 \cdot 10^3$	242	36	5,5	0,16	0,13	0,01	0,003
0,01	$139 \cdot 10^3$	946	142	21,6	0,62	0,49	0,05	0,011
0,1	$776 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$	788	120	3,5	2,7	0,3	0,063
0,2	$1,37 \cdot 10^6$	$9,3 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	213	6,1	4,9	0,53	0,111
0,5	$3,3 \cdot 10^6$	$22,1 \cdot 10^3$	$3,31 \cdot 10^3$	505	14,6	11,6	1,27	0,26
0,8	$6,2 \cdot 10^6$	$42,1 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^3$	964	27,8	22	2,4	0,504
0,9	$8,2 \cdot 10^6$	$55,5 \cdot 10^3$	$8,3 \cdot 10^3$	1269	36,6	29	3,2	0,66
0,99	$13,9 \cdot 10^6$	$94,5 \cdot 10^3$	$14,2 \cdot 10^3$	2161	62	49	5,4	1,13
0,999	$19,0 \cdot 10^6$	$129 \cdot 10^3$	$19,3 \cdot 10^3$	2951	85	67,5	7,4	1,5

ВЫВОДЫ

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению основных электрических характеристик проводов, покрытых сшитым полиэтиленом, при типовых эксплуатационных воздействиях.

2. Результаты экспериментов и теоретические разработки позволили достаточно достоверно определить вольт-временные характеристики изоляции покрытых проводов в детерминированном и вероятностном вариантах:

• при напряжении 14 кВ и ниже пробой образцов не наблюдался. Поэтому при рабочем напряжении ВЛ возможность пробоя между проводом и заземленным предметом практически исключена;

• при напряжении 24 кВ и выше, что соответствует максимально возможному уровню перенапряжения при замыкании фазы на землю, вероятен пробой покрытия проводов в дефектных местах. Вероятность попадания заземленного предмета на такой участок покрытия весьма невелика. По результатам экспериментов она составляет порядка 0,05;

• при атмосферных перенапряжениях (42 кВ и выше) пробой изоляции возможен. Поэтому перед наступлением грозового периода линия должна быть осмотрена и очищена от упавших деревьев и веток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка системы грозозащиты для воздушных линий 10 кВ с покрытыми проводами (ВЛП 10). Заключительный отчет по х/д № 1873/96. – Мн., 1998.

2. Подвесные скрученные кабели, провода SAХ, волоконно-оптические грозозащитные тросы. Каталог фирмы «НОКИА КАБЕЛЬ». – Хельсинки, 1993. – 27 с.

3. Провод с изолирующей оболочкой для воздушных линий электропередачи до 20 кВ типа АСИ: Технические условия: ТУ РБ 00114241–99. – Мн., 1999.

4. Степанчук К. Ф., Тиняков Н. А. Техника высоких напряжений. – Мн.: Выш. шк. – 1982. – С. 450.

5. Степанчук К. Ф. Модели разрушения изоляции в процессе эксплуатации и их анализ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 4. – С. 26–33.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 30.05.2002

УДК 621.316

СОВРЕМЕННАЯ СТОЛБОВАЯ ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ПОДСТАНЦИЯ МОЩНОСТЬЮ 25–100 кВ·А

Инж. ДОРОФЕЙЧИК А. Н.

РУП «Гродноэнерго»

В начале 90-х гг. прошлого столетия в РУП «Гродноэнерго» была разработана и освоена столбовая трансформаторная подстанция (СТП) мощностью 25–100 кВ·А на напряжение 10/0,4 кВ. За семь с половиной лет эксплуатации первой СТП замечаний по ее работе не было.

Комплектность СТП 25–100 кВ·А на напряжение 10/0,4 кВ приведена в табл. 1.