

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522

УДК 621.316

Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

Часть 2

М. А. Короткевич¹, С. И. Подгайский², А. В. Голомуздов²

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²ПО «Энергокомплект» (Витебск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Оценка целесообразности применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями на те же напряжения с бумажно-масляной изоляцией выполнена на основе метода многоцелевой оптимизации, позволяющего учесть не только количественные (приведенные затраты), но и качественные показатели. В качестве показателя надежности работы кабельной линии принята максимальная наработка на отказ (значение, обратно пропорциональное параметру потока отказов), которая у кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена на порядок больше, чем у кабельных линий с бумажной изоляцией. Комплексная оценка удобства монтажа кабельной линии показала, что монтаж кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена отличается большим в 1,2–1,6 раза удобством монтажа по сравнению с трехжильными (на напряжение 10 кВ) и в 1,4 раза – по сравнению с одножильными маслонаполненными кабелями на напряжение 110 кВ. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена доказана нами на основе метода многоцелевой оптимизации, где учитывались как приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельных линий, так и надежность ее работы, удобство монтажа и другие качественные показатели. Если учитываемые цели одинаково важны, то кабели с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 10–110 кВ более эффективны по сравнению с трехжильными (на напряжение 10 кВ) и одножильными (на напряжение 110 кВ) кабелями с бумажной изоляцией. При этом стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена может превышать стоимость кабеля с бумажной изоляцией до двух раз. Если наиболее важная цель состоит в обеспечении минимума приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельной линии, то применение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ наиболее целесообразно в отдельных случаях.

Ключевые слова: кабельные линии электропередачи, напряжение 6–110 кВ, изоляция из сшитого полиэтилена, бумажно-масляная изоляция, надежность, удобство монтажа, многоцелевая оптимизация

Для цитирования: Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 2 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 6. С. 505–522. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522

Адрес для переписки

Короткевич Михаил Андреевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

Address for correspondence

Korotkevich Mishail A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

The Efficacy of the Cables of 6–110 kW with XLPE Insulation

Part 2

M. A. Korotkevich¹⁾, S. I. Podgaiskiy²⁾, A. V. Golomuzdov²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾JSC “Energokomplekt” Industrial Association (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. The assessment of the suitability of cables of 6–110 kW with XLPE insulation in comparison with cables of the same voltage but possessing paper-oil insulation has been fulfilled on the basis of the method of multi-objective optimization that makes it possible to account not only the quantitative characteristics (of reduced costs), but also qualitative ones. As an indicator of the reliability of the cable line the maximum mean time to failure (the value inversely proportional to the parameter of succession of failures), which is an order more for cable lines with XLPE insulation than for cable lines with paper insulation, is adopted. A comprehensive assessment of the convenience of installation of cable lines revealed that the installation of cable with XLPE insulation features a 1.2–1.6 times easier installation as compared to three-wire (voltage 10 kW) and 1.4 times easier installation as compared to single-core oil-filled cables (voltage of 110 kW). The efficacy of the cables 6–110 kW with XLPE insulation is proved on the basis of the method of multi-objective optimization, that took into account as the costs for the construction and operation of cable lines and the reliability of its operation, ease of its installation and other quality indicators. If the goals taken into account are considered as equally important, the polyethylene-insulated cables for a voltage of 10–110 kW is more efficient as compared to three-wire (voltage 10 kW) and solid (110 kW) cables with paper insulation. Herewith, the cost of the cable with XLPE insulation may exceed the cost of cable with paper insulation up to two times. If the most important aim is to provide the minimum reduced costs for the construction and operation of the cable line, the use of cables with XLPE insulation for voltage of 10 kW is most advisable in individual cases.

Keywords: cable lines, voltage of 6–110 kW, XLPE, paper-oil insulation, reliability, ease of installation, multi-purpose optimization

For citation: Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kW with XLPE Insulation. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (6), 505–522. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522 (in Russian)

Введение

Целесообразность использования кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией рассмотрим, в отличие от [1], на основе метода многоцелевой оптимизации применительно к кабельным линиям, выполненным кабелями:

– трехжильными площадью поперечного сечения жил 35–240 мм², напряжением 6–35 кВ;

– одножильными площадью поперечного сечения жил 35–240 мм² (кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) и трехжильными площадью поперечного сечения жил 35–240 мм² (кабели с бумажно-масляной изоляцией), напряжением 6–35 кВ;

– одножильными площадью поперечного сечения жил 150, 185, 240, 300, 400, 500, 630 мм² (кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) и од-

ножильными тех же площадей поперечного сечения жил (кабели маслонаполненные с бумажно-масляной изоляцией), напряжением 110 кВ.

Метод многоцелевой оптимизации позволяет учесть не только количественные (стоимостные) показатели, но и качественные, стоимостное выражение которых дать затруднительно.

В терминах метода многоцелевой оптимизации задачу сформулируем следующим образом: необходимо оценить целесообразность использования кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6–110 кВ по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией при достижении следующих целей:

- минимума приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий;
- максимума надежности работы;
- максимума удобства монтажа;
- максимальной длины линии без компенсации зарядной мощности;
- максимума допустимой разности высот прокладки кабеля;
- минимального воздействия на окружающую среду.

Целесообразность использования более дорогих кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена обеспечивается при достижении максимального значения критерия оптимизации $E \rightarrow \max [2, 3]$, т. е.

$$E = \sum_{i=1}^n v_i e_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

где v_i – оценка важности i -й цели, $i = 1, \dots, n$; e_i – относительная эффективность i -й цели.

Оценка важности i -й цели может быть задана, например, так:

– все цели одинаково важны, тогда $v_i = 0,167 \sum_{i=1}^n v_i = 1,0$;

– одна из целей наиболее важная, тогда $v_i = 0,6$; $\sum_{j \neq i}^{n-1} v_j = 0,4$; $j \neq i$ (при

допущении, что все остальные цели одинаково важны).

Получение точечной оценки значений v_i может быть достигнуто на основе ранжирования указанных целей экспертами – специалистами по проектированию, сооружению и эксплуатации электрических сетей, суммарное количество которых должно быть не менее десяти [2].

Результаты ранжирования оформляются, как показано в табл. 1.

Расчетный коэффициент R_i для каждой цели определяется по формуле

$$R_i = 1 + \frac{1}{n} - \frac{A_i}{nN}, \quad (2)$$

где N – количество экспертов.

Таблица 1

Обработка результатов ранжирования целей
Processing of the results of ranking the goals

Номер эксперта	Ранг цели, номер						Сумма рангов
	1	2	3	4	5	6	
1							21
2							21
...							...
10							21
Общая сумма рангов i -й цели	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	210
Расчетный коэффициент	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	$\sum_{i=1}^6 R_i = B$
Оценка важности целей	$v_1 = \frac{R_1}{B}$	$v_2 = \frac{R_2}{B}$	$v_3 = \frac{R_3}{B}$	$v_4 = \frac{R_4}{B}$	$v_5 = \frac{R_5}{B}$	$v_6 = \frac{R_6}{B}$	$\sum_{i=1}^6 v_i = 1,0$

В нашем примере $R_i = 1 + \frac{1}{6} - \frac{A_i}{6 \cdot 10} = 1,17 - \frac{A_i}{60}$.

Суммарное значение

$$B = \sum_{i=1}^6 R_i. \quad (3)$$

Численное значение значимости целей v_i

$$v_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^6 R_i} = \frac{R_i}{B}, \quad (4)$$

при этом $\sum_{i=1}^6 v_i = 1,0$.

Дадим оценку каждой (кроме значения приведенных затрат) из указанных выше целей.

**Оценка показателей надежности
кабельных линий электропередачи**

В соответствии с ГОСТ 27.002–89 [4] для объектов нижнего уровня электрических сетей (к которым относятся кабельные линии электропередачи) в качестве показателей надежности используют показатели, характеризующие безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Для оценки безотказности работы ремонтпригодного объекта (в частности, кабельных линий электропередачи) применяются показатели: пара-

метр потока отказов λ и средняя наработка на отказ $t_{\text{ср}}$, равная для стационарного потока отказов [5]

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы кабельной линии электропередачи на интервале времени t определяется по формуле

$$p = e^{-\lambda_0 \ell t}, \quad (6)$$

где λ_0 – параметр потока отказов, приходящийся на один километр линии, отказ/(км·год); ℓ – длина линии, км; средняя длина распределительной кабельной линии напряжением 10 кВ, связывающая между собой соседние трансформаторные подстанции, равна 0,6–0,8 км; максимальная длина питающих кабельных линий напряжением 10 кВ составляет в Республике Беларусь 6 км; t – рассматриваемый интервал времени, $t = 1$ год и $t = 30$ лет (срок службы кабеля).

Расчеты по формуле (6) показали, что к концу срока службы вероятность безотказной работы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена значительно, не менее чем в 3 раза, превышает вероятность безотказной работы кабелей с бумажно-масляной изоляцией.

Таким образом, у кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена наработка на отказ больше в 10 раз, а вероятность безотказной работы – не менее чем в 3 раза по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией.

Оценка удобства монтажа кабельных линий с кабелями с различной изоляцией

Удобство монтажа кабельных линий зависит от следующих факторов, характерных для кабелей с традиционной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена: массы барабанов с кабелем, который необходимо вывезти на трассу для последующего монтажа одного километра линии; внешнего диаметра кабеля; допустимого радиуса изгиба; допустимой отрицательной температуры наружного воздуха, при которой кабель прокладывается без его предварительного подогрева.

Известно, что чем меньше диаметр монтируемого кабеля, тем более легкие условия его монтажа.

Значения наружных диаметров кабелей на напряжения 10 и 110 кВ с изоляцией из различных материалов, по данным [6–9], приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что диаметр трехжильных кабелей на напряжение 10 кВ с бумажной изоляцией меньше диаметра таких же кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена примерно в 1,23 (кабели типов ААБ и АПвП) и в 1,16 (кабели типов ЦАСБ и АПвП) раза, или в среднем в 1,2 раза.

Диаметр одножильного маслонаполненного кабеля с бумажной изоляцией на напряжение 110 кВ в 1,1–1,15 раза больше диаметра кабеля на то же номинальное напряжение с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Таблица 2

**Наружные диаметры кабелей на напряжение 6–110 кВ
с изоляцией из различных материалов**

**The outer diameters of the cables for 6–110 kW
with insulation of different materials**

Номинальное напряжение, кВ	Площадь поперечного сечения жил, мм ²	Наружный диаметр кабеля, мм, типа				
		АПВП		ААБ	ЦАСБ	МНСК
		Одножильный	Трехжильный	Трехжильный	Одножильный	
6	70	25,71	49,49	–	–	–
	185	32,41	64,58	–	–	–
	240	34,91	70,98	–	–	–
10	70	27,51	57,87	47,0	49,9	–
	185	34,01	73,27	59,7	63,5	–
	240	36,41	78,22	65,9	–	–
20	70	31,71	67,07	–	–	–
	185	38,21	83,15	–	–	–
	240	40,61	88,31	–	–	–
35	70	37,71	80,57	–	–	–
	185	44,21	96,45	–	–	–
110	240	70,00	–	–	–	76,9/80,9

Диаметр трехжильных кабелей на напряжение 10 кВ с бумажной изоляцией больше диаметра одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,75 (кабели типов ААБ и АПВП) и в 1,83 (кабели типов ЦАСБ и АПВП) раза, или в среднем в 1,8 раза.

Оценка допустимого радиуса изгиба кабеля

Трехжильные кабели с полиэтиленовой изоляцией имеют меньший допустимый радиус изгиба по сравнению с трехжильными кабелями с бумажной изоляцией:

- в 1,5 раза – для кабелей со свинцовой оболочкой;
- в 2,5 раза – для кабелей с алюминиевой оболочкой.

Одножильные кабели с полиэтиленовой изоляцией имеют меньший (в 1,7 раза) допустимый радиус изгиба по сравнению с трехжильными кабелями с бумажной изоляцией и алюминиевыми оболочками.

Диапазон допустимых температур при прокладке кабеля без предварительного подогрева

Возможный диапазон температур, при которых производится прокладка кабеля без его предварительного подогрева:

- кабели с бумажно-масляной изоляцией: 41 °С (от 0 до 40 °С);
- кабели с полиэтиленовой изоляцией: 61 °С (от минус 15 или минус 20 °С до плюс 40 °С, включая 0 °С).

Следовательно, максимальный диапазон температур, при которых производится прокладка кабеля без его предварительного подогрева, для кабелей с полиэтиленовой изоляцией в 1,4 раза больше, чем для кабелей с бумажно-масляной изоляцией.

Интегральное соотношение удобства монтажа дадим на основе метода многоцелевой оптимизации применительно к кабельным линиям напряжениями 10 и 110 кВ. Относительные значения показателей целей приведены в табл. 3–5.

Таблица 3

**Относительные значения показателей и эффективности целей
 для трехжильных кабелей с различной изоляцией**
**The relative values of the indicators and efficiency targets
 for three-core cables with various insulation**

Наименование цели	Относительное значение показателя цели x_i			Относительная эффективность цели		
	Трехжильный кабель на напряжение 10 кВ					
	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа
	ААБ	ЦАСБ	АПвП	ААБ	ЦАСБ	АПвП
Минимальная масса барабанов с кабелем	1,0	1,0	1,22 (ААБ); 0,77 (ЦАСБ)	1,0	0,77	0,89 1,00
Минимальный наружный диаметр кабеля	1,0	1,0	1,2	1,0	1,00	0,83
Минимальный радиус изгиба	1,0	1,0	0,67 (ЦАСБ); 0,40 (ААБ)	0,40	0,67	1,0 1,0
Максимальный диапазон допустимых температур при прокладке кабеля	1,0	1,0	1,4	0,71	0,71	1,0
			Итого	3,11	3,15	3,72 (при сравнении с ААБ); 3,83 (при сравнении с ЦАСБ)

Относительная эффективность целей e_i определяется по формулам:

– для минимизируемых целей:

$$e_i = \frac{\min x_i}{x_i}; \quad (7)$$

– для максимизируемых целей:

$$e_i = \frac{x_i}{\max x_i}, \quad (8)$$

где x_i – текущее значение показателей целей; $\max x_i$, $\min x_i$ – максимальное и минимальное значения критерия оптимизации.

Таблица 4

**Относительные значения показателей и эффективности целей
для трехжильных кабелей с бумажной изоляцией
и одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена**

**The relative values of the indicators and the effectiveness of the objectives
for three-core cables with paper insulation and single-conductor cables
with insulation of cross-linked polyethylene**

Наименование цели	Относительное значение показателя цели x_i			Относительная эффективность цели		
	Трехжильный кабель на напряжение 10 кВ		Одножильный кабель на напряжение 10 кВ	Трехжильный кабель на напряжение 10 кВ		Одножильный кабель на напряжение 10 кВ
	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа
	ААБ	ЦАСБ	АПвП	ААБ	ЦАСБ	АПвП
Минимальная масса барабанов с кабелем	1,0	1,0	0,97 (ААБ); 0,67 (ЦАСБ)	0,97	0,67	1,0
Минимальный наружный диаметр кабеля	1,0	1,0	0,57 (ААБ); 0,55 (ЦАСБ)	0,57	0,55	1,0
Минимальный радиус изгиба	1,0	1,0	0,59	0,59	0,59	1,0
Максимальный диапазон допустимых температур при прокладке кабеля	1,0	1,0	1,40	0,71	0,71	1,0
			Итого	2,84	2,52	4,0

При одинаковой важности всех целей значение критерия оптимизации E вычисляется как

$$E = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 e_i. \quad (9)$$

Монтаж трехжильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена ($E = 0,95$) отличается большим в 1,2 раза по сравнению с монтажом кабелей типов ААБ и ЦАСБ удобством.

Монтаж одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ отличается большим удобством соответственно в 1,4 и 1,6 раза по сравнению с монтажом трехжильных кабелей типов ААБ и ЦАСБ, имеющих бумажно-масляную изоляцию.

Монтаж линии из одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 110 кВ представляется в 1,4 раза более удобным, чем монтаж одножильного маслонаполненного кабеля с бумажной изоляцией на то же напряжение.

Таблица 5

**Относительные значения показателей и эффективности целей
 для одножильных кабелей с различной изоляцией**
**The relative values of the indicators and the effectiveness of the objectives
 for single-core cables with different insulation**

Наименование цели	Относительное значение показателя цели x_i		Относительная эффективность цели	
	Одножильный кабель на напряжение 110 кВ			
	с бумажно-масляной изоляцией типа	с изоляцией из сшитого полиэтилена типа	с бумажно-масляной изоляцией типа	с изоляцией из сшитого полиэтилена типа
	МНС	АПвП	МНС	АПвП
Минимальная масса барабанов с кабелем	1,0	0,71	0,71	1,0
Минимальный наружный диаметр кабеля	1,0	0,87	0,87	1,0
Минимальный радиус изгиба	1,0	0,59	0,59	1,0
Максимальный диапазон допустимых температур при прокладке кабеля	1,0	1,40	0,71	1,0
		Итого	2,88	4,0

Оценка значения зарядного тока кабельной линии

Известно, что у кабелей с полиэтиленовой изоляцией значение зарядного тока меньше (из-за меньшей рабочей емкости по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией), почти на порядок меньше электрические потери мощности, учитываемой у кабелей напряжением 110 кВ. Потери активной мощности у обоих типов рассматриваемых кабелей с площадью поперечного сечения жил до 240 мм², пропорциональные активному сопротивлению жил, можно считать одинаковыми (или в 1,07 раза больше у кабелей с полиэтиленовой изоляцией из-за большей допустимой температуры их нагрева) [10]. Потери напряжения и потери реактивной мощности из-за большего индуктивного сопротивления одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена будут больше по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией.

Компенсация емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжениями 6; 10; 20; 35 кВ должна предусматриваться тогда, когда значение указанных токов превышает 30; 20; 15; 10 А соответственно.

Предельная протяженность кабельных линий без компенсации емкостных токов замыкания на землю определяется по формуле

$$\ell_{\text{пред}} = \frac{I_{\text{Спред}}}{I_{\text{C0}}} = \frac{I_{\text{Спред}}}{3U_{\phi} \omega C_0 \cdot 10^{-3}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{Спред}}$ – предельное значение емкостного тока замыкания на землю, когда допускается работа без применения средств компенсации указанного тока, равно 30; 20; 15; 10 А для сети напряжениями 6; 10; 20; 35 кВ; I_{C0} – удельное значение емкостного тока замыкания на землю кабельной сети, А/км, зависит от площади поперечного сечения жил кабелей; U_{ϕ} – фазное напряжение кабельных линий, кВ, равно $\frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}}$, $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение сети, кВ; $\omega = 314$ 1/с - угловая частота; C_0 – емкость жилы кабеля относительно оболочки, мкФ/км.

Значение I_{C0} , вычисленное при U_{ϕ} , кВ, и C_0 , мкФ/км, будет иметь размерность А/км.

Емкость жилы кабеля относительно оболочки характеризует работу трехфазной кабельной линии при замыкании на землю и для одножильных кабелей и кабелей напряжениями 20 и 35 кВ, имеющих отдельно экранированные или покрытые отдельной металлической оболочкой круглые жилы, вычисляется по формуле

$$C_0 = \frac{0,0241\epsilon_r}{\lg \frac{R}{r}}, \quad (11)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, принимается равной 3,5 – для кабелей с пропитанной бумажной изоляцией; 3,7 – для маслонаполненных; 2,3 – для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена; R – радиус по изоляции, мм; r – радиус жилы, мм.

Емкость трех жил по отношению к металлической оболочке для трехжильных кабелей может быть подсчитана по приближенной формуле [10, 11]

$$C_0 = \frac{0,0241\epsilon_r}{\lg \frac{b + \delta_{\text{н}} + \delta_{\text{п}}}{b}}, \quad (12)$$

где b – расчетная высота сектора или диаметр жилы, мм; $\delta_{\text{н}}$ – толщина изоляции жилы, мм; $\delta_{\text{п}}$ – толщина поясной изоляции, мм.

Для кабельных линий с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена предельная протяженность без компенсации емкостных токов определяется как

$$\ell_{\text{пред}}^{\text{н}} = \frac{I_{\text{Спред}}}{3U_{\phi} \omega C_0^{\text{н}} \cdot 10^{-3}}. \quad (13)$$

Тогда при одинаковых указанных геометрических размерах кабелей с различной изоляцией имеем

$$\frac{\ell_{\text{пред}}^n}{\ell_{\text{пред}}} = \frac{C_0}{C_0^n} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon^n}. \quad (14)$$

При $\varepsilon_r = 3,5$; $\varepsilon^n = 2,3$ $\ell_{\text{пред}}^n = 1,5\ell_{\text{пред}}$, т. е. предельная протяженность кабельных линий с кабелями с полиэтиленовой изоляцией в 1,5 раза превышает допустимую протяженность линий с кабелями с бумажно-масляной изоляцией по условию работы без компенсации емкостных токов замыкания на землю.

Оценка допустимой разности высот прокладки кабеля

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена допускают неограниченную разность высот прокладки, в то время как допустимая разность высот прокладки кабелей с бумажной изоляцией составляет 15 м.

Если сравниваемые значения отличаются между собой на несколько порядков, для характеристики интенсивности их изменения может быть применен десятичный или натуральный логарифм отношения двух крайних (максимального и минимального) значений этой величины.

Неограниченная разность высот прокладки кабелей с полиэтиленовой изоляцией по сравнению с кабелями с бумажной изоляцией может быть описана следующим образом:

$$\delta h = \lg \frac{h^n}{h}, \quad (15)$$

где δh – оценка увеличения высоты прокладки кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена; h^n , h – допустимая разность высот прокладки кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (для условий Республики Беларусь больше 1000–1500 м не требуется) и допустимая разность высот прокладки кабелей с бумажно-масляной изоляцией (равна 15 м).

При указанных крайних значениях h^n и h их отношение равно 100 и $\delta h = 2,0$. Отмеченное значение может быть учтено в качестве показателя самостоятельной цели – максимальная допустимая разность высот прокладки кабеля.

Допустимая неограниченная разность высот прокладки кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена косвенно учитывается в надежности работы кабельной линии (отражается в меньшем значении параметра потока отказов по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией, не пропитанной нестекающим составом).

Оценка воздействия кабелей на окружающую среду

Функционирование кабельных линий сопровождается влиянием на них окружающей среды и влиянием кабельных линий на окружающую среду (земля, вода, воздух).

Грунт, где прокладываются кабельные линии, характеризуется влажностью, степенью кислотной, щелочной, т. е. коррозионной, активности, удельным электрическим сопротивлением.

Природа и внешние факторы ограничивают условия прокладки кабелей:
– с изоляцией из сшитого полиэтилена и поливинилхлоридной наружной оболочкой – значением влажности грунта;
– с бумажной пропитанной изоляцией – значениями коррозионной активности грунта, вибрацией.

В целом можно сказать, что окружающая среда одинаково влияет на кабельные линии, независимо от материала изоляции кабелей.

Теперь рассмотрим влияние подземных кабельных линий на окружающую среду.

На трассах кабельных линий допускается проведение сельскохозяйственных работ, однако строительство домов и посадка крупных деревьев исключаются.

Электрическое и магнитное поля вокруг кабельной линии даже напряжением 500 кВ незначительны. Однако при работе кабеля он нагревается, что приводит к иссушению почвы и оказывает негативные воздействия на находящиеся там живые организмы.

Особенность применения кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена, по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией, состоит в том, что в них отсутствует жидкий диэлектрик, который может вытекать в почву при выполнении ремонтных работ на линиях напряжением 6–35 кВ или утекать из баков давления, трубопроводов, концевых, соединительных и стопорных муфт на линиях с маслонаполненными кабелями напряжением 110 кВ (масса масла в канале одного километра кабеля – 100 кг, в бумажной изоляции – 620 кг [9]) при транспортировке, монтаже и эксплуатации. Для исключения попадания воздуха в изоляцию кабеля, заправленные маслом, наматываются на барабан и каждый барабан снабжается баком давления, размещаемым в шейке барабана и обеспечивающим избыточное давление масла при транспортировке, хранении и монтаже кабеля.

Сказанное позволяет установить соотношение факторов воздействия кабельных линий с бумажной и искусственной изоляцией на окружающую среду

$$\frac{I_{\text{окр}}^{\text{п}}}{I_{\text{окр}}} = \frac{a}{a + I_{\text{р}}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{р}}}{a}}, \quad (16)$$

где $I_{\text{окр}}^{\text{п}}$, $I_{\text{окр}}$ – факторы воздействия на окружающую среду кабельных линий с полиэтиленовой и бумажно-масляной изоляцией; a – годовые расходы по воспроизводству природных ресурсов, связанных с нагревом почвы; $I_{\text{р}}$ – годовые расходы по воспроизводству природных ресурсов, связанных с утечкой нефтяного масла в почву.

Структура формулы (16) позволяет указать, что при любых значениях отношения $\frac{I_{\text{р}}}{a}$ значение $I_{\text{окр}}^{\text{п}} < I_{\text{окр}}$, т. е. негативное воздействие кабелей

с полиэтиленовой изоляцией на окружающую среду меньше, чем кабелей с пропитанной бумажной изоляцией. При $I_p = a$ $I_{окр}^n = 0,5I_{окр}$, что может быть характерно для кабелей напряжением до 35 кВ. Для маслонаполненных кабелей следует ожидать, что $I_p > a$, и при $I_p = 2a$ $I_{окр}^n = 0,33I_{окр}$.

Для комплексной оценки эффективности применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена воспользуемся методом многоцелевой оптимизации и приведенной выше формулировкой задачи.

Составим табл. 6–8 относительных значений показателей целей рассматриваемых вариантов.

Таблица 6

Относительные значения показателей и эффективности целей для трехжильных кабелей с различной изоляцией

The relative values of the indicators and the effectiveness of the objectives for three-core cables with various insulation

Наименование цели	Относительное значение показателя цели x_i			Относительная эффективность цели		
	Трехжильный кабель на напряжение 10 кВ					
	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа
	ААБ	ЦАСБ	АПвП	ААБ	ЦАСБ	АПвП
Минимум приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий	1,0	1,0	1,3/1,06	1,0	1,0	0,77/0,943
Максимум надежности работы (наработки на отказ)	1,0	1,0	10,0	0,1	0,1	1,0
Максимум удобства монтажа	1,0	1,0	1,2	0,83	0,83	1,0
Максимальное значение длины линии без компенсации зарядной мощности	1,0	1,0	1,5	0,67	0,67	1,0
Максимальная допустимая разность высот прокладки кабеля	1,0	2,0	2,0	0,5	1,0	1,0
Минимальное воздействие на окружающую среду	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0

Примечание. Стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена превышает стоимость кабеля с бумажно-масляной изоляцией в 2 раза (числитель) и в 1,2 раза (знаменатель).

Таблица 7

**Относительные значения показателей и эффективности целей
для трехжильных кабелей с бумажной изоляцией
и одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена**
**The relative values of the indicators and the effectiveness of the objectives
for three-core cables with paper insulation and single-conductor cables
with insulation of cross-linked polyethylene**

Наименование цели	Относительное значение показателя цели x_i			Относительная эффективность цели		
	Трехжильный кабель на напряжение 10 кВ		Одножильный кабель на напряжение 10 кВ	Трехжильный кабель на напряжение 10 кВ		Одножильный кабель на напряжение 10 кВ
	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа	с бумажно-масляной изоляцией типа		с изоляцией из сшитого полиэтилена типа
	ААБ	ЦАСБ	АПвП	ААБ	ЦАСБ	АПвП
Минимум приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий	1,0	1,0	1,3/1,06	1,0	1,0	0,77/0,943
Максимум надежности работы (наработки на отказ)	1,0	1,0	10,0	0,1	0,1	1,0
Максимум удобства монтажа	1,0	1,0	1,4 (ААБ); 1,6 (ЦАСБ)	0,71	0,63	1,0
Максимальное значение длины линии без компенсации зарядной мощности	1,0	1,0	1,5	0,67	0,67	1,0
Максимальная допустимая разность высот прокладки кабеля	1,0	2,0	2,0	0,5	1,0	1,0
Минимальное воздействие на окружающую среду	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0
Примечание. Стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена превышает стоимость кабеля с бумажной изоляцией в 2 раза (числитель) и в 1,2 раза (знаменатель).						

Значение относительной эффективности целей определено по формулам (7), (8).

Значение критерия оптимизации E равно:

– при одинаковой важности целей $E = 0,75$ и $0,83$ (соответственно кабели с бумажно-масляной изоляцией типов ААБ и ЦАСБ) и $E^n = 0,96$ и $0,99$ (соответственно кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена при стоимости кабеля в 2 и 1,2 раза больше стоимости кабелей типов ААБ и ЦАСБ).

Отношение $\frac{E^n}{E} \geq 1,2$, что говорит о большей эффективности применения

трехжильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ по сравнению с трехжильными кабелями с бумажно-масляной изоляцией при рассматриваемых стоимостях кабелей;

– если наиболее важная цель состоит в обеспечении минимума приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий (значение важности цели примем равным 0,6), то при важности цели по надежности работы (0,2) и одинаковой важности ($v_3 = v_4 = v_5 = v_6 = 0,05$) оставшихся целей критерий оптимизации будет равен:

– для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$$E^{\text{н}} = (0,77 \cdot 0,6) + (1,0 \cdot 0,2) + 4 \cdot 0,05 = 0,862 \text{ (для данных числителя);}$$

$$E^{\text{д}} = (0,943 \cdot 0,6) + (1,0 \cdot 0,2) + 4 \cdot 0,05 = 0,9658 \text{ (для данных знаменателя);}$$

– для кабелей типа ААБ

$$E_{\text{ААБ}} = (1,0 \cdot 0,6) + (0,1 \cdot 0,2) + (0,83 + 0,67 + 0,5 + 0,5) \cdot 0,05 = 0,745;$$

– для кабелей типа ЦАСБ

$$E_{\text{ЦАСБ}} = (1,0 \cdot 0,6) + (0,1 \cdot 0,2) + (0,83 + 0,67 + 1,0 + 0,5) \cdot 0,05 = 0,77.$$

Таблица 8

Относительные значения показателей и эффективности целей для одножильных кабелей с различной изоляцией
The relative values of the indicators and the effectiveness of the objectives for single core cables with different insulation

Наименование цели	Относительное значение показателя цели x_i		Относительная эффективность цели	
	Одножильный кабель на напряжение 110 кВ			
	с бумажно-масляной изоляцией типа	С изоляцией из сшитого полиэтилена типа	с бумажно-масляной изоляцией типа	С изоляцией из сшитого полиэтилена типа
	МНС	АПвП	МНС	АПвП
Минимум приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий	1,0	1,23	1,0	0,81
Максимум надежности работы (наработки на отказ)	1,0	10,0	0,1	1,0
Максимум удобства монтажа	1,0	1,4	0,71	1,0
Максимальное значение длины линии без компенсации зарядной мощности	1,0	1,5	0,67	1,0
Максимальная допустимая разность высот прокладки кабеля	1,0	2,0	0,5	1,0
Минимальное воздействие на окружающую среду	1,0	0,53	0,33	1,0

Примечание. Стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена превышает стоимость кабеля с бумажной изоляцией в 2 раза.

Если стоимость трехжильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена превышает стоимость трехжильного кабеля с бумажно-масляной изоляцией в 1,2 или 2 раза, то использование кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена более эффективно, так как $E^n > E_{\text{ААБ}}$ и $E^n > E_{\text{ЦАСБ}}$; при этом $E^n = (1,12-1,25)E$, т. е. $E^n \geq 1,2E$ в отдельных случаях.

Значение критерия оптимизации E равно:

– при одинаковой важности целей $E = 0,631$ (кабели типа ААБ) и $0,676$ (кабели типа ЦАСБ), $E^n = 0,961$ (кабели типа АПвП – при их стоимости, в 2 раза превышающей стоимость кабелей типов ААБ и ЦАСБ) и $0,99$ (при стоимости, в 1,2 раза превышающей стоимость кабеля с бумажной изоляцией).

Отношение $\frac{E^n}{E} = 1,52$ – при сравнении с кабелем типа ААБ и $1,42$ – при сравнении с кабелем типа ЦАСБ, стоимости которых меньше стоимости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в 2 раза, что доказывает высокую эффективность и целесообразность применения одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ по сравнению с трехжильными кабелями с бумажно-масляной изоляцией;

– если наиболее важная цель состоит в обеспечении минимума приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий, то:

$E = 1 \cdot 0,6 + 0,1 \cdot 0,2 + (0,71 + 0,67 + 0,5 + 0,5)0,05 = 0,739$ – для кабелей типа ААБ;

$E = 1 \cdot 0,06 + (0,1 \cdot 0,2) + (0,63 + 0,67 + 0,1 + 0,5)0,05 = 0,76$ – для кабелей типа ЦАСБ;

$E^n = 0,77 \cdot 0,6 + 1,0 \cdot 0,2 + (1,0 + 1,0 + 1,0 + 1,0)0,05 = 0,862$ – для кабелей типа АПвП (когда их стоимость больше стоимости кабелей типов ААБ и ЦАСБ в 2 раза);

$E^n = 0,943 \cdot 0,6 + 1,0 \cdot 0,2 + (1,0 + 1,0 + 1,0 + 1,0)0,05 = 0,9658$ – для кабелей типа АПвП (когда их стоимость больше стоимости кабелей типов ААБ и ЦАСБ в 1,2 раза).

Как видно из полученных результатов, $E^n > E$, что подтверждает эффективность применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена даже в условиях превышения его стоимости в 2 раза стоимости кабеля с бумажной изоляцией (здесь $E^n = 1,13E$).

ВЫВОДЫ

1. Оценка целесообразности применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями на те же напряжения с бумажно-масляной изоляцией выполнена на основе метода многоцелевой оптимизации, позволяющего учесть не только количественные (приведенные затраты), но и качественные показатели, стоимостное выражение которым дать затруднительно, в частности надежность работы, удобство монтажа линий, предельную длину кабельных линий без необхо-

димости компенсации зарядной мощности, разность высот прокладки кабеля и др. При этом сравнивались между собой кабели различных конструктивных исполнений и материала изоляции: трехжильные с бумажной изоляцией и трехжильные с изоляцией из сшитого полиэтилена; трехжильные с бумажной изоляцией и одножильные с изоляцией из сшитого полиэтилена; одножильные маслонаполненные кабели напряжением 110 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабели напряжением 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.

2. В качестве показателя надежности работы кабельной линии принята максимальная наработка на отказ (значение, обратно пропорциональное параметру потока отказов), которая у кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена на порядок больше, чем у кабельных линий с бумажной изоляцией.

3. Комплексная оценка удобства монтажа кабельной линии, включающая оценки массы барабанов с кабелем, необходимых для монтажа одного километра линии, значений наружного диаметра и допустимого радиуса изгиба, а также диапазона допустимых температур при прокладке кабеля без его предварительного подогрева, выполненная нами на основе метода многоцелевой оптимизации, показала, что монтаж кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена отличается большим в 1,2–1,6 раза удобством монтажа по сравнению с трехжильными (на напряжение 10 кВ) и в 1,4 раза по сравнению с одножильными маслонаполненными кабелями на напряжение 110 кВ.

4. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена доказана нами на основе метода многоцелевой оптимизации, где учитывались как приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельных линий, так и надежность ее работы, удобство монтажа и другие качественные показатели. Оказалось, что если учитываемые цели одинаково важны, то критерий оптимизации для линий с одножильными кабелями с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 10–110 кВ превышает такой же критерий, характерный для трехжильных (на напряжение 10 кВ) и одножильных (на напряжение 110 кВ) кабелей с бумажной изоляцией более чем в 1,2 раза, т. е. более целесообразно использование кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. При этом стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена может превышать стоимость кабеля с бумажной изоляцией до двух раз. Кабельные линии с трехжильными кабелями на напряжение 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена не имеют существенных преимуществ перед такими же линиями с кабелями с бумажно-масляной изоляцией.

Если наиболее важная цель состоит в обеспечении минимума приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельной линии, то применение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ наиболее целесообразно в случаях, когда стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена не превышает стоимость кабеля с бумажно-масляной изоляцией более чем в 1,2 или в 2 раза (кабели на напряжение 110 кВ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 1 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432
2. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электротехнических установок / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. 224 с.
3. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей / М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2014. 350 с.
4. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения: ГОСТ 27.002–89. М.: Изд-во стандартов, 1989. 37 с.
5. Скопинцев, В. А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть / В. А. Скопинцев. М.: Энергоатомиздат, 2009. 332 с.
6. Кабели и провода. Каталог продукции. Витебск: Производственное объединение «Энергокомплект», 2015. 58 с.
7. Кабели маслonaполненные на переменное напряжение 110–500 кВ. Технические условия: ГОСТ 16441–78. М.: Изд-во стандартов, 1978. 39 с.
8. Пантелеев, Е. Г. Монтаж и ремонт кабельных линий: справочник электромонтажника / Е. Г. Пантелеев. М.: Энергоатомиздат, 1990. 228 с.
9. Бронгулеева, М. Н. Кабельные линии высокого напряжения / М. Н. Бронгулеева, С. С. Городецкий. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 512 с.
10. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С. С. Рокотьяна, И. М. Шапиро. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
11. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 768 с.

Поступила 28.03.2017 Подписана в печать 25.05.2017 Опубликована онлайн 28.11.2017

REFERENCES

1. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kW with XLPE Insulation. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 417–432 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432.
2. Guk Yu. B. (1998) *Reliability Analysis of Electrical Installations*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad Branch. 224 (in Russian).
3. Korotkevich M. A. (2014) *Operation of Electric Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 350 (in Russian).
4. State Standard 27.002–89 (1989). *Reliability in Technique. The Basic Concepts, Terms and Definitions*. Moscow, Publishers of Standards. 37 (in Russian).
5. Skopintsev V. A. (2009) *The Quality of Electric Power Systems: Reliability, Security, Economy, Survivability*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 332 (in Russian).
6. *The Cables and Wires. The Product Catalog*. Vitebsk, “Energoкомплект” Production Association, 2015. 58 (in Russian).
7. State Standard 16441–78 (1978). *Oil-Filled Cables for Alternating Voltage 110–500 kW. Specifications*. Moscow, Publishers of Standards. 39 (in Russian).
8. Panteleev E. G. (1990) *Installation and Repair of Cable Lines: the Handbook for Construction Electrician*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 228 (in Russian).
9. Bronguleeva M. N., Gorodetskii S. S. (1963) *Cable High-Voltage Lines*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 512 (in Russian).
10. Rokotyana S. S., Shapiro I. M. (eds.) (1985) *Handbook of Design of Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 352 (in Russian).
11. Baumshtein A., Bazhanov S. A. (eds.) (1989) *Handbook of Electrical High-Voltage Installations*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 768 (in Russian).

Received: 28 March 2017

Accepted: 25 May 2017

Published online: 28 November 2017