

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 60, № 5 (2017), с. 417–432
Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 60, No 5 (2017), pp. 417–432 417

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432

УДК 621.316

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

Часть 1

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

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

²⁾ПО «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 критерия приведенных затрат. 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. Увеличение длительно допустимого тока нагрузки на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена из-за большей допустимой температуры его нагрева по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией соответствует до как бы увеличению площади поперечного сечения жил кабеля (в размере до 0,61 от первоначальной) и, следовательно, обеспечивает снижение стоимости кабеля за счет снижения стоимости изготовления токопроводящих жил. Приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена (при повышении стоимости кабеля в 1,2 и 2 раза по сравнению со стоимостью кабеля с трехжильной изоляцией), несмотря на снижение затрат на изготовление токопроводящих жил и сниженные годовые эксплуатационные расходы (на 9 и 17 % соответственно кабельные линии напряжением до 35 и 110 кВ), оказываются большими приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с бумажной изоляцией. В настоящее время стоимость одного метра кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена меньше стоимости кабелей типов ААБ, ЦАСБ, ААШв напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами, что обеспечивает безусловную эффективность их применения.

Ключевые слова: кабельные линии электропередачи, сшитый полиэтилен, бумажно-масляная изоляция, приведенные затраты, стоимость производства кабелей, капитальные вложения

Для цитирования: 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

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@bntu.by

Address for correspondence

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

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

Part 1

M. A. Korotkevich¹⁾, S. I. Podgaitskiy²⁾, A. V. Golomuzdov²⁾

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

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

Abstract. The assessment of the suitability of cables of 6–110 kV with XLPE insulation in comparison with cables of the same voltage but possessing paper-oil insulation has been fulfilled on the basis of the criterion of reduced costs. Thus, the comparison was undertaken between cables of various design and material of insulation: three-core paper insulated ones vs. three-core XLPE insulated ones; three-core paper-insulated ones vs. solid wires with XLPE insulation; single-core oil-filled cables of 110 kV with paper insulation vs. solid wires of 110 kV with XLPE insulation. The increase in long-term permissible current loads for cables with XLPE insulation because of the larger permissible temperature of heating in comparison with cables with paper-oil insulation complies with as would increase in the cross-sectional area of cable cores (equal to 0.61 from the original) and therefore reduces the cost of the cable by reducing the cost of manufacture of conductors. The reduced costs of the construction and operation of cable lines with XLPE insulation (accounting the increase in the cost of a cable 1.2 and 2 times as compared with the cost of a cable with three-core insulation), despite the decline in the cost of manufacture of conductors and the reduced annual operating costs (9 % and 17 % respectively of cable lines of voltage of up to 35 kV and 110 kV), occurred to be more than the reduced costs of the construction and operation of cable lines with paper insulation. Currently the cost of one meter of cable with XLPE insulation is less than the cost of cables of AAB, CASB, AASv types of a voltage of 10 kV with aluminium cores, that ensures their undeniable efficacy.

Keywords: cable transmission lines, XLPE, paper-oil insulation, reduced costs, production cost of the cables, capital investments

For citation: Korotkevich M. A., Podgaitskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432 (in Russian)

Введение

В последние годы в электрических сетях стали применять трехжильные кабели на напряжение 6–35 кВ, а также одножильные кабели на напряжение до 110 кВ с полиэтиленовой изоляцией. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению со стоимостью кабелей с бумажно-масляной изоляцией, они обладают неоспоримыми преимуществами перед кабелями с бумажно-масляной изоляцией:

- значительно меньшей повреждаемостью (на один-два порядка);
- меньшей массой;
- неограниченной разностью уровней прокладки (у кабелей с бумажно-масляной изоляцией отмеченная разность не должна превышать 15 м);
- возможностью изготовления кабелей площадью сечения жил до 1200 мм² (вместо 240 мм² у кабелей с бумажно-масляной изоляцией);
- более высоким током термической стойкости (допустимая температура нагрева 250 °С вместо 200 °С);

- большей пропускной способностью за счет более высокой допустимой температуры нагрева жил (90 °С вместо 70 °С);
- меньшим допустимым радиусом изгиба;
- возможностью прокладки при температуре до минус 20 °С без предварительного подогрева;
- более высоким сопротивлением изоляции при рабочей температуре жил и, следовательно, меньшими диэлектрическими потерями (особенно при напряжении 110 кВ).

Выпускаемые предприятием «Энергокомплект» кабели различаются по выполнению разделительных слоев до медного экрана (первый слой) и после него (второй слой), наличием брони (трехжильные кабели напряжением 6–35 кВ) или ее отсутствием (одножильные кабели напряжением 6–110 кВ), наличием внутренней оболочки (одножильные кабели напряжением 6–110 кВ с алюминиевыми жилами и трехжильные кабели напряжением 6–35 кВ с медными жилами) и ее отсутствием (одножильные кабели с медными жилами напряжением 6–110 кВ).

Целесообразность применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией рассмотрим 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 одножильными тех же площадей поперечного сечения жил (кабели маслонаполненные с бумажно-масляной изоляцией) напряжением 110 кВ.

Для оценки указанной целесообразности применения силовых электрических кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по отношению к кабелям с пропитанной бумажной изоляцией воспользуемся как методом приведенных затрат, так и методом многоцелевой оптимизации [1, 2].

Определение приведенных затрат

Приведенные ежегодные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельной линии $K_{к.л}$ и расходов на ее эксплуатацию I записываются как

$$Z = E_k K_{к.л} + I, \quad (1)$$

где E_k – коэффициент эффективности капитальных вложений (при ставке рефинансирования Национального банка Республики Беларусь, равной 15 %, $E_k = 0,15$).

Рассмотрим соотношение составляющих выражения (1), относящихся к кабельным линиям с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена и бумажно-масляной изоляцией.

Капитальные затраты на сооружение кабельной линии

Указанные затраты $K_{к.л}$ состоят из затрат на приобретение кабеля $K_к$ и затрат на его прокладку $K_п$.

В суммарной стоимости сооружения кабельных линий стоимость кабелей составляет в среднем 48 % для линий напряжением 6–10 кВ; 57,5 % – для линий напряжением 35 кВ [3]; 23–52 % или в среднем 37,5 % – для линий напряжением 20 кВ [4] и 33 % – для линий напряжением 110 кВ [3],

т. е. $\frac{K_к}{K_{к.л}} = 0,48; 0,375; 0,575$ и $0,33$ соответственно для кабельных линий

напряжением 6–10; 20; 35 и 110 кВ.

Стоимость прокладки трехжильных кабелей с вязкой или искусственной изоляцией можно считать одинаковой и равной 52; 62,5; 42,5; 67 % от суммарной стоимости кабельной линии соответственно для линий напряжением 6–10; 20; 35 и 110 кВ. Здесь стоимость прокладки оценивалась как

$$K_п = \left(1 - \frac{K_к}{K_{к.л}} \right) K_{к.л}. \quad (2)$$

Отношение стоимости сооружения кабельной линии с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена $K_{к.л}^п$ к стоимости сооружения кабельной линии с кабелями с бумажно-масляной изоляцией $K_{к.л}$ представим в виде

$$\frac{K_{к.л}^п}{K_{к.л}} = 1 + \frac{\alpha_2 - 1}{\alpha_1}, \quad (3)$$

где $\alpha_1 = \frac{K_{к.л}}{K_к}$ – коэффициент, учитывающий, во сколько раз стоимость со-

оружения кабельной линии превышает стоимость собственно кабеля, значение α_1 равно 2,08; 2,67; 1,74 и 3,3 соответственно для линий напряже-

нием 6–10; 20; 35 и 110 кВ; $\alpha_2 = \frac{K_к^п}{K_к}$ – коэффициент, учитывающий увели-

чение стоимости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью кабеля с комбинированной изоляцией, значение α_2 больше единицы, но хотелось бы, чтобы оно было равно или меньше единицы.

При $\alpha_2 \leq 1$ стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена не превышает стоимости сооружения кабельной линии с кабелем с бумажно-масляной изоляцией.

Если $\alpha_2 > 1$ ($\alpha_2 = 1,2$ (1,5; 2,0)), то стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с искусственной изоляцией выше стоимости сооружения кабельной линии с кабелем с комбинированной изоляцией.

Значение $\alpha_2 < 1$ имеет место, например, при сравнении стоимости сооружения кабельной линии с кабелем с полиэтиленовой изоляцией со стоимостью сооружения кабельной линии с кабелем с бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим изоляционным составом, например, церезином (кабели, предназначенные для прокладки на вертикальных и наклонных трассах без ограничения разности уровней, например, кабель типа ЦАСБ).

Соотношения стоимостей сооружения кабельных линий с кабелями с различной изоляцией, определенные по (3), приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Соотношения стоимостей сооружения кабельных линий
с кабелями с различной изоляцией**
**The ratio of the costs of construction of cable lines
using cables with various insulations**

Номинальное напряжение линии, кВ	α_1	α_2	$\frac{K_{к.л}^п}{K_{к.л}}$
6–10	2,08	1,2	1,10
		1,5	1,24
		2,0	1,48
20	2,67	1,2	1,07
		1,5	1,19
		2,0	1,37
35	1,74	1,2	1,11
		1,5	1,29
		2,0	1,57
110	3,33	1,2	1,06
		1,5	1,15
		2,0	1,30

Примечание. $K_{к.л}$, $K_{к.л}^п$ – стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с бумажно-масляной изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Как видно из данных табл. 1, увеличение стоимости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью кабеля с бумажно-масляной изоляцией в 1,2...2 раза приведет к увеличению стоимости сооружения линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,1...1,48; 1,07...1,37; 1,11...1,57; 1,06...1,3 раза соответственно для линий напряжением 6–10; 20; 35; 110 кВ.

При сопоставлении капитальных затрат на сооружение кабельной линии с одножильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена с трехжильными кабелями с бумажно-масляной изоляцией необходимо иметь в виду снижение затрат на прокладку кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена за счет:

- меньшей массы барабанов с кабелем, вывозимых на трассу;
- необходимости монтажа меньшего количества соединительных муфт из-за больших строительных длин кабеля;

- меньшего диаметра каждого из одножильных кабелей по сравнению с трехжильным кабелем с бумажной изоляцией;
- меньшего допустимого радиуса изгиба по сравнению с трехжильными кабелями с алюминиевой оболочкой;
- отсутствия необходимости прогрева кабеля при монтаже в условиях отрицательных температур.

Масса барабанов кабелей для сооружения 1 км линии определена нами по данным [5–7].

Массы барабанов с трехжильным с бумажно-масляной изоляцией $G_{б.к}$ и одножильным с изоляцией из сшитого полиэтилена $G_{б.к}^n$ кабелями для сооружения линии протяженностью 1 км будут равны:

$$\begin{aligned} G_{б.к} &= G_{1бар} m_{бар} + q_{уд}; \\ G_{б.к}^n &= G_{1бар} m_{бар}^n + 3,01 q_{уд(1)}^n, \end{aligned} \quad (4)$$

где $G_{1бар}$ – масса барабана без кабеля, для деревянных барабанов № 20, 22, 26 равна соответственно 800, 1020, 1700 кг [8]; $m_{бар}$, $m_{бар}^n$ – количество барабанов для размещения трехжильного и одножильного кабелей, $m_{бар} = \frac{1000}{\ell_k}$, $m_{бар}^n = \frac{3000}{\ell_{к(1)}}$; $q_{уд}$, $q_{уд(1)}^n$ – удельная масса трехжильного и одножильного кабелей, кг/км; ℓ_k , $\ell_{к(1)}$ – длина трехжильного и одножильного кабелей, умещаемых на барабане.

Нами установлено, что масса барабанов с трехжильным кабелем с алюминиевыми жилами, свинцовой оболочкой и бумажно-масляной изоляцией, пропитанной нестекающим составом, на напряжение 6 и 10 кВ больше массы барабанов с трехжильным кабелем на те же напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена примерно в 1,3 раза.

Масса барабанов с трехжильным кабелем с бумажно-масляной изоляцией с алюминиевыми жилами и алюминиевыми оболочками на напряжения 6 и 10 кВ меньше, а со свинцовой оболочкой больше массы барабанов с трехжильным кабелем с алюминиевыми жилами и изоляцией из сшитого полиэтилена примерно в 1,12 раза.

Масса барабанов с одножильным кабелем с алюминиевыми жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена меньше массы трехжильного кабеля с пропитанной и не пропитанной нестекающим составом изоляцией на напряжения 6 и 10 кВ с алюминиевыми жилами на те же напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,3 раза.

Масса барабанов с одножильным маслонаполненным кабелем с медными жилами и бумажной изоляцией на напряжение 110 кВ больше массы барабанов с кабелем с медными жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена, необходимой для сооружения одного километра линии, в 1,4 раза (медные жилы) и 1,6 раза (алюминиевые жилы).

Стоимость сооружения кабельной линии можно представить как

$$K_{к.л} = K_к + K_п = K_к \left(1 + \frac{K_п}{K_к} \right) = K_к (1 + \alpha_3), \quad (5)$$

где $\alpha_3 = \frac{K_п}{K_к} \geq 1$ – коэффициент, указывающий, во сколько раз стоимость прокладки кабеля превышает стоимость самого кабеля, значение α_3 , по данным ПО «Энергокомплект», равно 1,0 (для линий с кабелями с бумажно-масляной изоляцией) и 2,0 (для линий с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена).

При принятых условиях стоимость сооружения кабельных линий с кабелями с различной изоляцией будет одинаковой, если $K_к^п = \frac{2}{3} K_к$, т. е. если стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена будет меньше стоимости кабеля с традиционной изоляцией (такое соотношение может иметь место при рассмотрении применения кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим составом с церезином, и кабелей с алюминиевыми жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена с наружной полиэтиленовой оболочкой с ленточной стальной броней или без нее).

В других рассматриваемых ситуациях $K_к^п = (1,2; 1,5; 2)K_к$ и тогда

$$\frac{K_{к.л}^п}{K_{к.л}} = \frac{K_к^п(1+2)}{K_к(1+1)} = \frac{1,5(1,2...2,0)K_к}{K_к} = 1,8 (2,25; 3),$$

т. е. стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена превышает стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с бумажной пропитанной изоляцией в 1,8...3 раза.

При оценке стоимости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена необходимо учитывать факт увеличения пропускной способности кабелей за счет роста допустимой температуры нагрева жил.

Соотношения длительных допустимых токов нагрузки для трехжильных кабелей с алюминиевыми и медными жилами с бумажно-масляной изоляцией и трехжильных и одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 6; 10; 20; 35; 110 кВ при прокладке в земле приведены, в соответствии с данными [5–7] в табл. 2, 3.

Увеличение длительного допустимого тока соответствует как бы росту необходимой площади поперечного сечения жил кабеля δF , т. е.

$$\delta F = \frac{1}{j_n} (I_d^п - I_d), \quad (6)$$

где j_n – нормируемая плотность тока, для кабелей с бумажной изоляцией с алюминиевыми (числитель) или медными (знаменатель) жилами равна 1,6/3,0; 1,4/2,5; 1,2/2,0 А/мм² (при использовании максимальной нагрузки до

3000 ч; 3000–5000 ч и более 5000 ч) [5]; $I_{д}^{п}$, $I_{д}$ – длительно допустимый ток на кабели с полиэтиленовой и бумажной изоляцией.

Таблица 2

Соотношение допустимых длительных токов нагрузки для трехжильных и одножильных кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена при прокладке в земле

The ratio of the permissible continuous load currents for three-core cables and solid wires with aluminium cores with paper insulation and XLPE insulation for burying a cable

Площадь поперечного сечения жил, мм ²	Длительно допустимый ток, А, при напряжении						Увеличение площади поперечного сечения, мм ² , при напряжении					
	10 кВ, по данным		20 и 35 кВ, по данным		110 кВ, по данным		10 кВ для числа жил		20 и 35 кВ для числа жил		110 кВ для числа жил	
	[5]	[6]	[5]	[6]	[7]	[6]	3	1	3	1	1	
50	140	$\frac{156}{170}$	125	$\frac{161}{175}$	–	–	11,4	21,4	25,7	35,7	–	
70	165	$\frac{193}{210}$	155	$\frac{199}{215}$	–	–	20,0	32,1	31,4	42,8	–	
95	205	$\frac{233}{253}$	185	$\frac{233}{253}$	–	–	20,0	34,3	34,3	48,6	–	
120	240	$\frac{265}{288}$	210	$\frac{265}{288}$	–	–	17,8	34,3	39,2	55,7	–	
150	275	$\frac{300}{322}$	240	$\frac{300}{322}$	320	360	17,8	33,6	42,8	58,7	28,5	
185	310	$\frac{338}{364}$	275	$\frac{339}{365}$	354	396	20,0	18,6	45,7	64,2	30,0	
240	355	$\frac{392}{422}$	–	–	390	455	26,4	21,4	–	–	46,4	
400	–	–	–	–	470	587	–	–	–	–	77,8	
500	–	–	–	–	510	654	–	–	–	–	102,8	
630	–	–	–	–	542	719	–	–	–	–	126,4	

Примечания: 1. Числитель – для трехжильных, знаменатель – для одножильных кабелей с алюминиевыми жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена.

2. На напряжении 110 кВ рассматриваются одножильные маслонаполненные кабели низкого давления с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией и одножильные кабели, которые расположены по треугольнику, а экраны кабелей соединены между собой и заземлены с двух сторон.

Из данных табл. 2 (когда кабели с алюминиевыми жилами прокладываются в земляных траншеях) и формулы (6) (при $j_n = 1,4$ А/мм²) следует, что увеличение площади поперечного сечения δF составляет:

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ:

$$(0,21-0,28)F \text{ – при } F = 50-95 \text{ мм}^2; (0,11-0,15)F \text{ – при } F = 120-240 \text{ мм}^2,$$

где F – площадь поперечного сечения жил кабеля;

Таблица 3

Соотношение допустимых длительных токов нагрузки для трехжильных и одножильных кабелей с медными жилами с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена при прокладке в земле
The ratio of the permissible continuous load currents for three-core cables and solid wires with copper conductor with paper insulation and XLPE insulation for burying a cable

Площадь поперечного сечения жил, мм ²	Длительно допустимый ток, А, при напряжении								Увеличение площади поперечного сечения, мм ² , при напряжении							
	10 кВ, по дан-ным		20 кВ, по дан-ным		35 кВ, по дан-ным		110 кВ, по дан-ным		10 кВ, для числа жил		20 кВ, для числа жил		35 кВ, для числа жил		110 кВ, для числа жил	
	[5]	[6]	[5]	[6]	[5]	[6]	[7]	[6]	3	1	3	1	3	1	1	
	70	215	$\frac{253}{275}$	200	$\frac{248}{275}$	–	–	–	–	15,2	24,0	19,2	30,0	–	–	–
95	265	$\frac{300}{326}$	240	$\frac{300}{326}$	–	–	–	–	14,0	24,4	24,0	34,4	–	–	–	
120	310	$\frac{340}{370}$	275	$\frac{341}{370}$	270	$\frac{341}{370}$	–	–	12,0	24,0	26,4	38,0	28,4	40,0	–	
150	355	$\frac{384}{413}$	315	$\frac{384}{413}$	310	$\frac{384}{413}$	320	440	11,6	23,2	27,6	39,2	29,6	41,23	48,0	
185	400	$\frac{433}{466}$	355	$\frac{433}{466}$	–	$\frac{433}{466}$	354	480	13,2	26,4	31,2	44,4	–	–	50,4	
240	460	$\frac{500}{537}$	–	$\frac{500}{537}$	–	–	390	537	16,0	30,8	–	–	–	–	58,8	
300	–	–	–	–	–	–	430	581	–	–	–	–	–	–	60,4	
400	–	–	–	–	–	–	478	644	–	–	–	–	–	–	66,4	
500	–	–	–	–	–	–	510	693	–	–	–	–	–	–	73,2	
630	–	–	–	–	–	–	542	737	–	–	–	–	–	–	78,0	

Примечания: 1. Числитель – для трехжильных, знаменатель – для одножильных кабелей с медными жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена.
 2. На напряжении 110 кВ рассматриваются одножильные маслонаполненные кабели низкого давления, которые расположены по треугольнику и имеют соединенные между собой и заземленные с двух сторон экраны.

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$$(0,36–0,45)F \text{ – при } F = 50–95 \text{ мм}^2; (0,1–0,28)F \text{ – при } F = 120–240 \text{ мм}^2;$$

– трехжильные кабельные линии напряжением 20–35 кВ:

$$(0,36–0,45)F \text{ – при } F = 50–95 \text{ мм}^2; (0,25–0,32)F \text{ – при } F = 120–240 \text{ мм}^2;$$

– трехжильные кабельные линии напряжением 20 и 35 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,51-0,7)F$ – при $F = 50-95 \text{ мм}^2$; $(0,35-0,46)F$ – при $F = 120-185 \text{ мм}^2$;

– одножильные маслонаполненные кабели напряжением 110 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,19)F$ – при $F = 150-630 \text{ мм}^2$.

Из данных табл. 3 (когда кабели с медными жилами прокладываются в земляных траншеях) и формулы (6) (при $j_n = 2,5 \text{ А/мм}^2$) следует, что увеличение площади поперечного сечения δF составляет:

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,15-0,2)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,07-0,1)F$ – при $F = 120-240 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,26-0,34)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,13-0,2)F$ – при $F = 120-240 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 20 кВ:

$(0,25-0,26)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,17-0,22)F$ – при $F = 120-185 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 20 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,36-0,42)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,24-0,31)F$ – при $F = 120-185 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 35 кВ:

$(0,2-0,23)F$ – при $F = 120-150$;

– трехжильные кабельные линии с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 35 кВ:

$(0,27-0,33)F$ – при $F = 120-150 \text{ мм}^2$;

– одножильные маслонаполненные кабели низкого давления с бумажной изоляцией и одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,27-0,32)F$ – при $F = 150-185 \text{ мм}^2$; $(0,12-0,24)F$ при $F = 240-630 \text{ мм}^2$.

Значения доли увеличения площади поперечного сечения рассматриваемых кабелей с традиционной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена содержатся в табл. 4.

Стоимость единицы длины кабеля K_k , руб./м, состоит из стоимости изоляции $K_{из}$ и стоимости токоведущих жил $K_{ж}$

$$K_k = K_{из} + K_{ж} = K_{из} + F\gamma c_{ж} \cdot 10^{-6} = G_{из} c_{из} + G_{ж} c_{ж}, \quad (7)$$

где γ – удельный объемный вес или плотность материала жилы (для меди равен 8890 кг/м³, для алюминия – 2703 кг/м³); $c_{ж}$ – стоимость единицы массы жилы, 3,7 и 10,2 руб./кг – соответственно алюминиевой и медной жил; $G_{из}$ – масса изоляции одного метра длины кабеля, кг; $c_{из}$ – стоимость одного килограмма изоляции, руб./кг (в среднем можно принять 397 руб./кг); $G_{ж} = F\gamma \cdot 10^{-6}$ – масса одного метра жилы, кг/м.

Таблица 4

Расчетные значения доли увеличения площади поперечного сечения жил кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена
 Calculated values of the percentage of increase in cross-sectional area for the cores with XLPE insulation

Рассматриваемое соотношение между кабельными линиями	Номинальное напряжение линии, кВ	Доля увеличения площади поперечного сечения жил кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при площади поперечного сечения жил, мм ²									
		70	95	120	150	185	240	300	400	500	630
		Трехжильные кабельные линии с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена	10	0,21 0,28	0,15 0,21	0,10 0,15	0,08 0,12	0,07 0,10	0,07 0,11	–	–
	20	0,27 0,45	0,25 0,36	0,22 0,32	0,18 0,28	0,17 0,25	–	–	–	–	–
	35	–	–	0,24 0,32	0,2 0,28	–	–	–	–	–	–
Трехжильные кабельные линии с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена	10	0,43 0,45	0,25 0,36	0,2 0,28	0,15 0,22	0,14 0,12	0,13 0,09	–	–	–	–
	20	0,42 0,61	0,36 0,51	0,31 0,46	0,26 0,39	0,24 0,34	–	–	–	–	–
	35	–	–	0,33 0,46	0,27 0,39	–	–	–	–	–	–
Одножильные маслонаполненные кабельные линии низкого давления и одножильные кабельные линии с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена	110	–	–	–	0,32 0,19	0,27 0,16	0,24 0,19	0,2 0,19	0,17 0,19	0,15 0,20	0,12 0,20

Примечание. Числитель – медные жилы; знаменатель – алюминиевые жилы.

Расчеты по формулам (7) и (8) приведены в табл. 5.

Стоимость единицы длины кабеля с полиэтиленовой изоляцией

$$K_k^n = K_{из}^n + F(1 - \sigma)\gamma c \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

где σ – коэффициент, меньший единицы, учитывающий повышение пропускной способности кабелей с полиэтиленовой изоляцией за счет повышения допустимой температуры нагрева жил (табл. 4).

Таблица 5

**Стоимость производства единицы длины кабеля (1 м)
с изоляцией из сшитого полиэтилена**

**The cost of production per a unit
of XLPE-insulated cable length (1 m)**

Номинальное напряжение кабеля, кВ	Масса полиэтилена, кг	Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	Стоимость изоляции, руб.	Масса жилы, кг		Стоимость 1 м жилы, руб.		Стоимость 1 м кабеля с жилами, руб.		Стоимость 1 м кабеля данной пропускной способности с жилами, руб.	
				алюминевой	медной	алюминевой	медной	алюминевой	медной	алюминевой	медной
6	0,1623	70	0,6456	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	1,3586	6,8847	1,158	6,030
6	0,2359	185	0,9486	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	2,7995	17,6021	2,611	16,500
6	0,2731	240	1,0962	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	3,4917	22,6544	3,228	21,330
10	0,2070	70	0,7929	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	1,5050	7,0320	1,306	6,188
10	0,2954	185	1,1484	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	2,9993	17,8019	2,814	16,750
10	0,3307	240	1,2870	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	3,6825	22,8452	3,419	21,510
20	0,332	70	1,2354	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	1,9484	7,4745	1,646	5,040
20	0,4564	185	1,7244	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	3,5753	18,3775	3,112	13,460
20	0,5061	240	1,9157	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	4,3112	23,1548	–	–
35	0,5578	70	1,9992	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	2,7122	8,2383	–	7,080
35	0,7346	185	2,6491	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	4,5000	19,3026	3,982	18,970
35	0,8054	240	2,9110	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	5,3065	24,1501	–	–
110	1,9444	150	9,0479	0,3890	1,6192	9,0470	16,6520	18,0945	25,6999	16,370	20,060
110	1,9703	240	9,2600	0,6320	2,0970	9,2380	21,5580	18,4980	30,8180	16,740	29,060
110	2,0798	400	9,9196	1,0277	3,3830	9,7950	34,7607	19,7146	44,6803	17,850	39,290
110	2,2380	500	9,7957	1,3440	4,4593	10,5335	46,0394	20,3292	55,8351	18,220	46,520
110	2,4364	630	11,6762	1,6868	5,6861	11,6760	58,6451	23,3524	70,3213	21,020	57,940

Примечание. Стоимость 1 м кабеля с бумажной изоляцией типа ААБ сечением жил 185 и 240 мм² на торгах в 2017 г. была равна 19,0 и 28,0 руб., а типа ЦАСБ – 26,2 и 35,8 руб.

Стоимость материала алюминиевой жилы превышает стоимость полиэтиленовой изоляции кабеля в 1,1...2,18 раза (кабели на напряжение 6 кВ, площадь поперечного сечения алюминиевых жил 70...240 мм²); в 1,61...1,86 раза (кабели на напряжение 10 кВ, площадь поперечного сечения алюминиевых жил 185...240 мм²); в 1,07...1,25 раза (кабели на напряжение 20 кВ, площадь поперечного сечения алюминиевых жил 185...240 мм²).

При площади поперечного сечения алюминиевых жил 70 мм^2 и номинальном напряжении кабеля 10; 20; 35 кВ стоимость материала жил меньше стоимости изоляции из сшитого полиэтилена.

Стоимость материала алюминиевой жилы сечением $150\text{--}630 \text{ мм}^2$ у кабелей напряжением 110 кВ примерно равна стоимости изоляции из сшитого полиэтилена.

Из данных табл. 5 видно, что стоимость материала медной жилы рассматриваемых сечений превышает стоимость полиэтиленовой изоляции кабеля в:

9,66...19,66 раза (кабели на напряжение 6 кВ);

7,86...16,75 раза (кабели на напряжение 10 кВ);

5,05...11,25 раза (кабели на напряжение 20 кВ);

3,12...7,4 раза (кабели на напряжение 35 кВ);

1,84...5,1 раза (кабели на напряжение 110 кВ).

Значение $K_{\text{к}}^{\text{п}}$ будет равно или меньше $K_{\text{к}}$, если соблюдается условие

$$K_{\text{из}}^{\text{п}} + F(1 - \sigma)\gamma c \cdot 10^{-6} \leq K_{\text{из}} + F\gamma c \cdot 10^{-6}$$

или

$$K_{\text{из}}^{\text{п}} - K_{\text{из}} \leq F\sigma\gamma c \cdot 10^{-6}; \quad K_{\text{из}}(a_1 - 1) \leq F\sigma\gamma c \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где $a_1 > 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение стоимости изоляции из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью бумажной изоляции.

Из (9) следует, что коэффициент a_1 не должен превышать значение

$$a_1 \leq 1 + \frac{F\sigma\gamma c \cdot 10^{-6}}{K_{\text{из}}}. \quad (10)$$

Отношение стоимости материала и изготовления жил к стоимости материала и изготовления изоляции кабеля из сшитого полиэтилена может лежать в широких пределах (значительно превышает единицу при медных жилах кабеля; быть большим или меньшим единицы – при алюминиевых жилах кабеля).

Следовательно, для обеспечения одинаковой стоимости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с кабелями с бумажной изоляцией необходимо, чтобы стоимость изоляции из сшитого полиэтилена не превышала стоимость бумажной изоляции в 1,45; 1,7 и 1,64 раза соответственно для кабелей на напряжение 10; 20–35 и 110 кВ. При отмеченных значениях a_1 можно ожидать, что приведенные затраты на сооружение кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена будут меньше таких же затрат для сооружения кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией.

Оценка значения годовых эксплуатационных расходов

По кабельным линиям с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабельными линиями с бумажно-масляной изоляцией сокращаются расходы на эксплуатацию за счет отсутствия необходимости в:

- составлении карты почвенных коррозионных зон;
- покрытии антикоррозионными лаками и красками неоцинкованной стальной брони кабелей, проложенных в кабельных сооружениях;
- периодической замене вертикальных участков кабельных линий из-за осушения изоляции;
- контроле за давлением и отборе проб масла из маслonaполненных кабельных каналов и муфт для определения характеристик масла и наличия в нем нерастворенного воздуха; ежемесячных осмотров подпитывающих пунктов (для маслonaполненных кабельных линий напряжением 110 кВ).

В результате затраты на техническое обслуживание кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена могут быть уменьшены по сравнению с соответствующими затратами на обслуживание кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией на:

- 9 % – для кабельных линий напряжением до 35 кВ;
- 17 % – для кабельных линий напряжением до 110 кВ.

Затраты на выполнение плановых и аварийных ремонтных работ на кабельных линиях электропередачи напряжением до 35 кВ с кабелями с полиэтиленовой изоляцией меньше на 15–18 %, чем на таких же линиях с бумажно-масляной изоляцией; при этом стоимость одного аварийного ремонта как зависит, так и не зависит от материала изоляции кабеля, а удельная повреждаемость кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на порядок меньше повреждаемости кабелей с бумажно-масляной изоляцией.

В целом отношение расходов на техническое обслуживание и ремонт кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена к соответствующим расходам по кабельным линиям с бумажно-масляной изоляцией равны 0,9 и 0,83 соответственно для линий напряжением до 35 и 110 кВ.

Следовательно, расходы на техническое обслуживание и ремонт кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с аналогичными расходами по линиям с кабелями с бумажно-масляной изоляцией меньше примерно на 10 % (линии напряжением до 35 кВ) и на 17 % (линии напряжением 110 кВ).

Если бы стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена была равна стоимости сооружения кабельной линии с бумажно-масляной изоляцией, то приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена были бы меньше соответствующих затрат по кабельной линии с традиционной изоляцией.

Торги, проведенные на Белорусской торговой бирже в декабре 2016 г. – марте 2017 г., показали, что стоимость 1 м кабеля типов ААБ, ЦАСБ, ААШв напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами превышает стоимость одного метра кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена одной и той же площади поперечного сечения не только с алюминиевыми, но и с медными жилами (табл. 5). Это обеспечивает меньшее значение капитальных и при-

веденных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена и, следовательно, указывает на безусловную эффективность их применения.

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 критерия приведенных затрат. 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. Так как стоимость сооружения кабельной линии состоит из стоимости кабеля и стоимости его прокладки, то увеличение стоимости силового электрического кабеля в $n = 1,2$ (1,5; 2) раза по сравнению со стоимостью традиционного кабеля приводит к увеличению стоимости сооружения кабельной линии электропередачи в 1,06–1,1 раза (при $n = 1,2$) и в 1,3–1,5 раза (при $n = 2$).

3. Увеличение длительно допустимого тока нагрузки на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена из-за большей допустимой температуры его нагрева по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией соответствует как бы увеличению площади поперечного сечения жил кабеля (в размере до 0,61 от первоначальной) и, следовательно, обеспечивает снижение стоимости кабеля за счет снижения стоимости изготовления токопроводящих жил.

4. Приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена (при превышении стоимости кабеля в 1,2 и 2 раза по сравнению со стоимостью кабеля с традиционной изоляцией), несмотря на снижение затрат на изготовление токопроводящих жил и сниженные годовые эксплуатационные расходы (на 9 и 17 % соответственно кабельные линии напряжением до 35 и 110 кВ) оказываются больше приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с бумажной изоляцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электротехнических установок / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. 224 с.
2. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей / М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2014. 350 с.
3. Козлов, В. А. Электроснабжение городов / В. А. Козлов. Л.: Энергия, 1977. 280 с.

4. Майоров, А. В. К обоснованию и выбору параметров кабельных линий 20 кВ в мегаполисе / А. В. Майоров, А. В. Шунтов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики. Минск: Бел. нац. техн. ун-т, 2015. С. 125–132.
5. Правила устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 646 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: справ. электромонтажника / Е. Г. Пантелеев. М.: Энергоатомиздат, 1990. 228 с.

Поступила 28.03.2017 Подписана в печать 02.06.2017 Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Guk Yu. B. (1988) *Reliability Analysis of Electrical Installations*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad Branch. 224 (in Russian).
2. Korotkevich M. A. (2014) *Operation of Electric Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 350 (in Russian).
3. Kozlov V. A. (1977) *The Power Supply of Cities*. Leningrad, Energiya Publ. 280 (in Russian).
4. Maiorov A. V., Shuntov A. V. (2015) Towards the Justification and Selection of Parameters of 20 kV Cable Lines in a Megapolis. *Methodical Problems of Research of Reliability of Large Energy Systems. Issue 66: Topical Problems of Reliability of Energy Systems*. Minsk, BNTU, 125–132 (in Russian).
5. *Rules for Eleecrical Units Installation* (1987). Moscow, Energoatomizdat Publ. 646 (in Russian).
6. *The Cables and Wires. The Product Catalog* (2015). Vitebsk, “Energoкомплект” Production Association. 58 (in Russian).
7. GOST 16441-78. Oil-Filled Cables for Alternating Voltage 110–500 kV. Specifications. Moscow, Standards Publishing House, 1978. 39 (in Russian).
8. Panteleev E. G. (1990) *Installation and Repair of Cable Lines: the Handbook for a Construction Electrician*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 228 (in Russian).

Received: 28 March 2017

Accepted: 2 June 2017

Published online: 29 September 2017