

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500>

УДК 621.315.2

## Выбор конструктивного устройства кабельных линий напряжением 10 кВ по критерию минимума приведенных затрат

М. Э. Высоцкий<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** В статье рассматривается вопрос выбора оптимальной конструкции кабельных линий напряжением 10 (20, 35) кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Анализируются варианты использования трех- или одножильных кабелей, прокладываемых треугольником или в плоскости. Методологической основой работы служит принцип минимизации приведенных затрат, учитывающий как капиталовложения, так и ежегодные издержки, включая потери электроэнергии в кабелях. В рамках исследования построена номограмма экономических интервалов, позволяющая определять оптимальные сечения жил кабелей и граничные условия применения трех- и одножильных кабелей в зависимости от расчетной токовой нагрузки. Показано, что при существующей номенклатуре трехжильных кабелей с максимальным сечением жилы до 630 мм<sup>2</sup> одножильные кабели могут быть экономически целесообразны только при сечении жил 800 мм<sup>2</sup> и выше. Установлено, что приведенные затраты на прокладку одножильных кабелей в плоскости при двухстороннем заземлении экранов всегда оказываются больше, чем при прокладке треугольником. Этот эффект обусловлен увеличением как капитальных затрат, так и потерь электроэнергии в экранах кабелей. Для повышения экономичности кабельных линий в работе предлагается расширить номенклатуру трехжильных кабелей, включив в нее кабели с максимально возможным сечением жилы. Это позволит увеличить диапазон токовых нагрузок, в котором применение трехжильных кабелей будет экономически оправданным. Представленные в статье результаты могут использоваться при проектировании новых кабельных линий, анализе эффективности существующих, а также при модернизации и реконструкции городских кабельных сетей среднего напряжения.

**Ключевые слова:** способ прокладки, траншея, трехжильные кабели, одножильные кабели, номограмма, метод экономических интервалов

**Для цитирования:** Высоцкий, М. Э. Выбор конструктивного устройства кабельных линий напряжением 10 кВ по критерию минимума приведенных затрат / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500>

---

### Адрес для переписки

Высоцкий Максим Эдуардович  
Белорусский национальный  
технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 33 661-76-75  
[elsyst@bntu.by](mailto:elsyst@bntu.by)

### Address for correspondence

Vysotski Maksim E.  
Belarusian National  
Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 33 661-76-75  
[elsyst@bntu.by](mailto:elsyst@bntu.by)

---

## The Choice of a Construction Arrangement for Cable Lines with a Voltage of 10 kV According to the Criterion of the Minimum Expected Cost

M. E. Vysotski<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article considers the issue of choosing the optimal construction arrangement of cable lines with a voltage of 10 (20, 35) kV with cross-linked polyethylene insulation. The options for using three- or single-core cables laid in a triangle or in a plane are analyzed. The methodological basis of the work is the principle of minimizing the expected costs, taking into account both capital investments and annual costs, including losses of electrical energy in cables. Within the framework of the study, a nomogram of economic intervals was scheduled, which makes it possible to determine the optimal cable core sections and boundary conditions for the use of three- and single-core cables, depending on the calculated current load. It is shown that with the existing nomenclature of three-core cables with a maximum core cross-section up to 630 mm<sup>2</sup>, single-core cables can be economically feasible only with a core cross-section of 800 mm<sup>2</sup> and above. It has been discovered that the expected costs for laying single-core cables in the plane with two-way grounding of screens always turn out to be higher than when laying a triangle. This effect is due to an increase in both capital costs and power losses in cable screens. To increase the efficiency of cable lines, it is proposed to expand the range of three-core cables by including cables with the maximum possible core cross-section. This will make possible to increase the range of current loads in which the use of three-core cables will be economically justifiable. The results presented in the article can be used in the design of new cable lines, the analysis of the effectiveness of existing ones, as well as in the modernization and reconstruction of urban medium-voltage cable networks.

**Keywords:** method of laying, trench, three-core cables, single-core cables, nomogram, method of economic intervals

**For citation:** Vysotski M. E. (2024) The Choice of a Construction Arrangement for Cable Lines with a Voltage of 10 kV According to the Criterion of the Minimum Expected Cost. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500> (in Russian)

### Введение

При проектировании кабельных линий напряжением 10 (20, 35) кВ возникает вопрос выбора оптимальной конструкции: трех- или одножильные кабели, прокладываемые треугольником или в плоскости? Различные конструкции будут отличаться техническими и экономическими характеристиками.

Анализ литературных источников показывает, что единого подхода к выбору оптимальной конструкции кабельных линий не существует. Ряд работ [1, 2] посвящен сравнительному анализу одно- и трехжильных кабелей с точки зрения монтажа, пропускной способности, повреждаемости и электробезопасности. Другие исследования [3–8] посвящены оптимизации способа прокладки одножильных кабелей с целью минимизации затрат и повышения пропускной способности. В [9] производится сравнительная оценка кабельных линий из одно- и трехжильных кабелей с воздушными

линиями на основании приведенных затрат с учетом капиталовложений, эксплуатационных расходов, ущерба окружающей среде и ущерба от недопуска электроэнергии. В [10] дается приближенная оценка капиталовложений для трех- и одножильных кабелей с учетом стоимости кабеля и соединительных и концевых муфт. Важно отметить, что подход, игнорирующий эксплуатационные расходы, может приводить к некорректным техническим решениям.

Вопросы заземления экранов рассматриваются в работах [11–15]. При двухстороннем заземлении экранов в трехжильных кабелях при соприкасающихся экранах отсутствуют циркулирующие индуцированные токи в отличие от одножильных кабелей. Двухстороннее заземление экранов представляется наиболее электробезопасным и практичным, а одностороннее заземление может применяться только для кабельных линий малой длины. При прокладке одножильных кабелей в плоскости с двухсторонним заземлением экранов возникают значительные индуцированные токи, превышающие токи при прокладке треугольником, что создает существенные дополнительные затраты [13].

Таким образом, несмотря на существующий объем исследований, остается необходимость в комплексном подходе к выбору экономически обоснованной конструкции кабельной линии 10 кВ, учитывающем как капитальные, так и эксплуатационные затраты. В связи с отсутствием обоснованных рекомендаций представляется целесообразным определить критерии выбора и оценить граничные условия различных конструкций кабелей. Методологической основой работы служит принцип минимизации приведенных затрат: сечения жил кабелей должны выбираться, прежде всего, по экономическим соображениям [16]. Экономичным решением считается то, которое соответствует минимуму приведенных затрат, включающих капиталовложения и эксплуатационные расходы.

Цель данной работы заключается в определении критериев для выбора и граничных условий применения трех- и одножильных кабелей, прокладываемых треугольником и в плоскости с точки зрения экономичности.

### **Приведенные затраты на сооружение кабельной линии электропередачи**

Сооружение кабельной линии с одно- и трехжильными кабелями связано с различными капитальными затратами и ежегодными издержками. Согласно методу экономических интервалов [17], для кабельных линий разных напряжений и исполнения определяются приведенные затраты в зависимости от тока для различных сечений на единицу длины без учета ущерба согласно выражению

$$Z = (E + p_a)K + 3I^2 R \tau \beta \cdot 10^{-3},$$

где  $K$  – стоимость линии, руб./км;  $E$  – нижняя граница эффективности капиталовложений, принимаемая не ниже ставки за предоставление кредита или за хранение средств в банке [18];  $p_a$  – коэффициент отчислений

на амортизацию,  $p_a = \frac{K - K_{л}}{K \cdot T_c}$ ;  $K_{л}$  – ликвидационная стоимость линии, руб./км;  $T_c$  – срок службы кабеля, для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена  $T_c = 30$  лет, принимая  $K_{л} = 0$ ,  $p_a = 0,033$ ;  $I$  – наибольшая сила тока в жиле (расчетный ток линии), А;  $R = R'(1 + y_s + y_p)(1 + \lambda_1 + \lambda_2)$  – эквивалентное электрическое сопротивление кабеля (при средней температуре жилы во время эксплуатации кабеля  $\frac{\theta - \theta_a}{3} + \theta_a = \frac{90 - 15}{3} + 15 = 40$  °С) [19], Ом/км;  $\theta$  – максимальная расчетная температура жилы, °С;  $\theta_a$  – температура окружающей среды, °С;  $\tau$  – эквивалентное время максимальных потерь (например, для осветительно-бытовой нагрузки городов 2500 ч в год [20]);  $\beta$  – тариф на электроэнергию в электрической сети (средневзвешенный тариф), руб./(кВт·ч).

При выборе площади сечения проводов величину ежегодных издержек в виде расходов на эксплуатацию следует принимать постоянной, так как они практически не зависят от площади поперечного сечения [18]. При использовании метода экономических интервалов постоянная часть затрат не влияет на экономические интервалы. Следовательно, величиной эксплуатационных расходов можно пренебречь без искажения точности результатов.

Капитальные затраты на сооружение кабельных линий состоят из капитальных затрат на приобретение кабеля и линейной арматуры (соединительных и концевых муфт) и затрат на прокладку (рытье земляных траншей, засыпку их дна сеяным песком, укладку кабеля на песчаную подушку, засыпку кабеля сеяным песком и грунтом, восстановление, если требуется, твердого покрытия улиц и тротуаров), монтаж соединительных и концевых муфт [21, 22]. Ввиду отсутствия в справочной литературе укрупненных показателей стоимости кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена для номинального ряда сечений, оценим затраты на капиталовложения для трех- и одножильных кабелей на основе цен на кабели и муфты и единых расценок на строительно-монтажные работы.

Капиталовложения на сооружение кабельной линии представим в виде

$$K = C_k + C_n,$$

где  $C_k$  – стоимость кабеля и муфт, руб./км;  $C_n$  – то же прокладки кабеля, руб./км.

Примем цены из [23] для кабелей марки АПвП с минимально возможными сечениями экранов, что характерно для резистивного заземления нейтрали. Кабели с сечением жилы  $S = 50\text{--}120$  мм<sup>2</sup> имеют медный экран с площадью поперечного сечения 16 мм<sup>2</sup>, с сечением жилы 150–300 – с площадью 25 мм<sup>2</sup> и с сечениями 400–1000 – с площадью 35 мм<sup>2</sup>.

Поскольку в [23] отсутствуют цены на трехжильные кабели сечением выше  $400 \text{ мм}^2$ , представим зависимость стоимости кабелей от сечения жилы в виде линейной функции и рассчитаем значения для сечений жил  $500$  и  $630 \text{ мм}^2$ , как это делалось в [4, 5]. Цены на соединительные и концевые муфты примем из [10].

На рис. 1 показан поперечный разрез типовых траншей для прокладки одно- и трехжильных одноцепных кабельных линий [24]. В табл. 1 представлены характеристики различных траншей. Ширина дна траншеи  $b$  выбирается в зависимости от ширины ковша экскаватора таким образом, чтобы от края кабеля до боковой стороны траншеи оставалось не менее  $100 \text{ мм}$ .

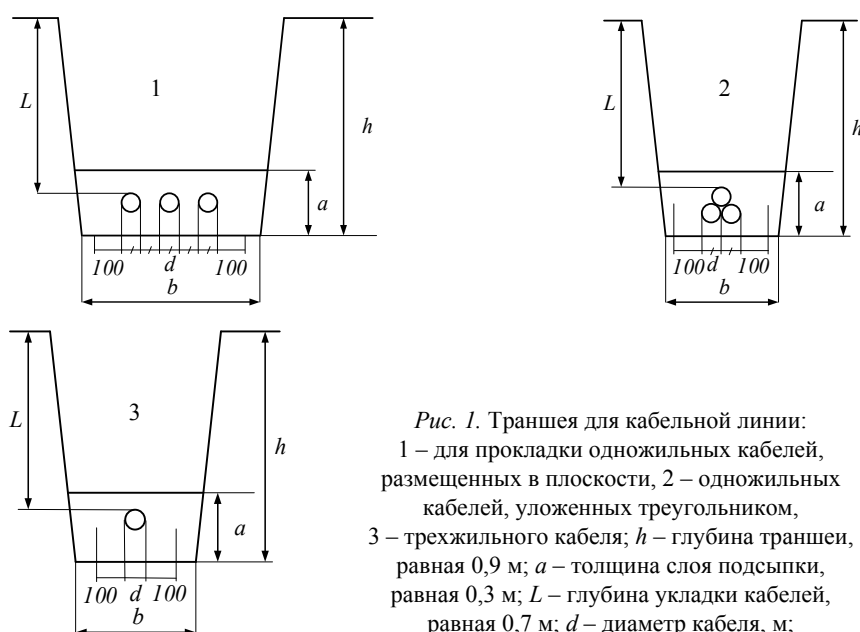


Рис. 1. Траншея для кабельной линии:  
1 – для прокладки одножильных кабелей, размещенных в плоскости, 2 – одножильных кабелей, уложенных треугольником, 3 – трехжильного кабеля;  $h$  – глубина траншеи, равная  $0,9 \text{ м}$ ;  $a$  – толщина слоя подсыпки, равная  $0,3 \text{ м}$ ;  $L$  – глубина укладки кабелей, равная  $0,7 \text{ м}$ ;  $d$  – диаметр кабеля,  $\text{м}$ ;  $b$  – ширина дна траншеи,  $\text{м}$

Fig. 1. Cable line trench: 1 – for laying single-core cables, laid in a plane, 2 – single-core cables laid in a triangle, 3 – three-core cable;  $h$  – the trench depth equal to  $0.9 \text{ m}$ ;  $a$  – bedding layer thickness equal to  $0.3 \text{ m}$ ;  $L$  – cable laying depth equal to  $0.7 \text{ m}$ ;  $d$  – cable diameter,  $\text{m}$ ;  $b$  – the width of the trench bottom,  $\text{m}$

Таблица 1

## Габариты земляных траншей и объемы земляных работ

## Dimensions of earth trenches and volumes of earthworks

Тип траншеи	$b$ , м	Объем земляных работ на 1 км траншеи, $\text{м}^3$		Объем песка или обогащенной песчано-гравийной смеси I группы на 1 км траншеи, $\text{м}^3$
		Рытье траншеи	Обратная засыпка	
T1	0,2	180	120	60
T2	0,3	270	180	90
T3	0,4	360	240	120
T4	0,5	450	300	150

Заметим, что земляные работы состоят из грунта, который будет вырыт в отвал и засыпан обратно, и грунта, который будет вырыт и вывезен, а на месте его окажется подсыпка.

Стоимость сооружения 1 км кабельной линии в траншее на основании норм расходов ресурсов [25] можно записать в виде составляющих

$$C_{\text{уст}} = (h - a)blC_1 + ablC_2 + C_3 + C_4 + ablC_5 + (h - a)blC_6 + ablC_7 + C_8,$$

где  $l$  – длина траншеи (принятая 1 км), м;  $C_1$  – стоимость разработки грунта в отвал экскаваторами, руб./м<sup>3</sup>;  $C_2$  – то же разработки грунта с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами, руб./м<sup>3</sup>;  $C_3$  – то же устройство постели для кабеля в траншее, руб./км;  $C_4$  – то же укладки кабеля в готовую траншею с массой кабеля на 1 м до 1, 3, 6 кг, руб./км;  $C_5$  – то же материала подсыпки, руб./м<sup>3</sup>;  $C_6$  – то же засыпки траншеи бульдозерами и работы на отвале, руб./м<sup>3</sup>;  $C_7$  – то же вывоза грунта на полигон, руб./м<sup>3</sup>;  $C_8$  – то же монтажа термоусаживаемых муфт кабелей напряжением 10 кВ, руб./шт.

Для расчета капиталовложений в кабельные линии разных сечений и конструкций примем следующие условия: траншея сооружается в грунте второй группы без асфальтобетонного покрытия по трассе кабельной линии. На основе этих исходных данных проведем расчеты и получим численные значения капиталовложений для различных вариантов кабельных линий. Результаты расчетов представлены в графическом виде на рис. 2.

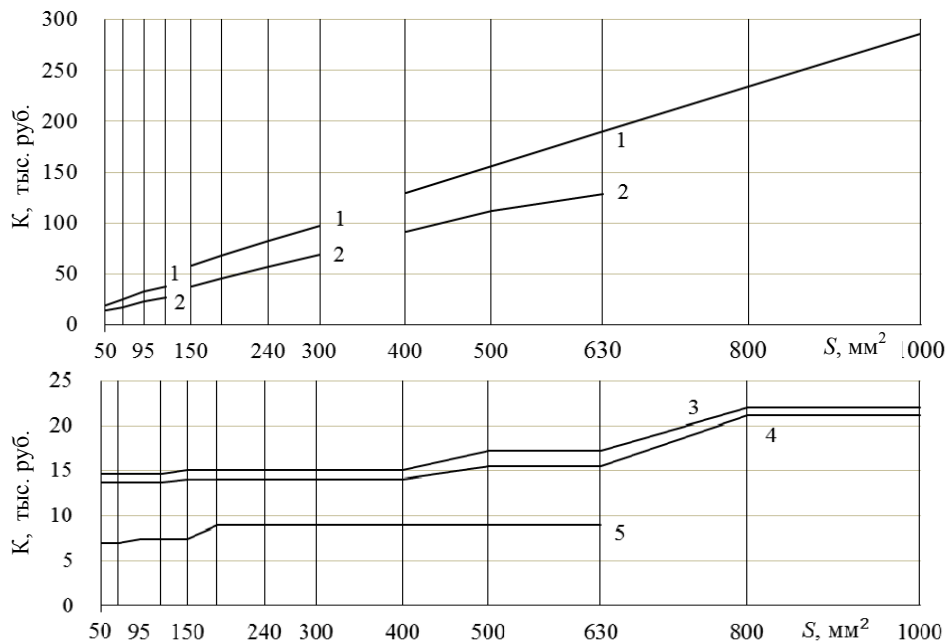


Рис. 2. Стоимость: 1 – трех одножильных кабелей; 2 – трехжильного кабеля; 3 – прокладки одножильных кабелей плоскости; 4 – то же одножильных кабелей треугольником; 5 – то же трехжильных кабелей

Fig. 2. The cost of: 1 – three single-core cables; 2 – a three-core cable; 3 – laying single-core cables in a plane; 4 – the same for single-core cables in a triangle; 5 – the same for three-core cables

Стоимость прокладки кабелей в траншее зависит от диаметра и погонной массы кабелей. Из рис. 2 видно, что прокладка одножильных кабелей в плоскости всегда оказывается дороже, чем прокладка треугольником, из-за большей ширины траншеи и соответственно больших объемов земляных работ. Стоимость прокладки составила около 34 % от общих капиталовложений для трехжильных кабелей сечением 50 мм<sup>2</sup> и около 41 % для одножильных кабелей того же сечения. Для кабелей с сечением жилы 630 мм<sup>2</sup> стоимость прокладки снизилась до 7 % от общих капиталовложений для трехжильных кабелей и до 8 % для одножильных кабелей.

### Номограмма для выбора сечения и конструкции кабеля

Для трехфазной кабельной линии наибольшее значение силы тока, при котором целесообразно переходить от площади сечения  $F_i$  к последующему из номинального ряда сечению  $F_{i+1}$ , можно определить по формуле [17, 20, 26]

$$I_{i+1} = \sqrt{\frac{(E + p_a)(K_{i+1} - K_i)}{3\tau\beta \cdot 10^{-3}(R_i - R_{i+1})}}$$

где  $K_i$  и  $K_{i+1}$  – капиталовложения в кабельные линии сравниваемых сечений;  $R_i$  и  $R_{i+1}$  – сопротивление линий сравниваемых сечений.

Экономический ток пропорционален величине  $\sqrt{\sigma} = \sqrt{\frac{E + p_a}{3\tau\beta \cdot 10^{-3}}}$ , введенной, чтобы избежать погрешностей и ошибок, связанных с осреднением значений экономической плотности тока, позволяющий представить ее линейной функцией [17, 27]. Величину  $\sqrt{\sigma}$  расположим в пределах:

$$\sqrt{\sigma_{\max}} = \sqrt{\frac{0,2 + 0,033}{3 \cdot 500 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}} = 0,8 \left( \frac{\text{кВт}}{\text{руб.}} \right)^{1/2};$$

$$\sqrt{\sigma_{\min}} = \sqrt{\frac{0,07 + 0,033}{3 \cdot 8700 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}} = 0,1 \left( \frac{\text{кВт}}{\text{руб.}} \right)^{1/2}.$$

Номограмма экономических интервалов представляет собой график зависимости  $\sqrt{\sigma}$  от  $I$  при минимуме приведенных затрат. Для построения номограммы необходимо для каждого сечения жилы найти граничные токи  $I_{i+1}$  при  $\sqrt{\sigma_{\max}}$  и  $\sqrt{\sigma_{\min}}$ . Далее строится прямая линия между этими точками. Если значения  $I_{i+1}$  оказываются ниже длительно допустимого тока кабеля, то линия строится только до этого значения, а далее строится горизонтальная линия оси значений  $\sqrt{\sigma}$ .

Минимум приведенных затрат для различных расчетных токов при номенклатуре трехжильных кабелей до 630 мм<sup>2</sup> оказывается выше после некоторого значения тока, чем минимум приведенных затрат для одножильных кабелей, прокладываемые треугольником. Значение экономического тока  $I_{гр}$  в месте пересечения кривых минимума затрат для одножильных кабелей, прокладываемых треугольником, и трехжильных кабелей может быть определено по выражению

$$Z_{зж.мин} = Z_{тр.мин},$$

где  $Z_{зж.мин}$  и  $Z_{тр.мин}$  – приведенные затраты для трех- и одножильных кабелей при обеспечении минимума затрат.

Запишем:

$$\begin{cases} Z_{зж.мин} = (E + p_a)K_{зж.мин} + 3I^2 R_{зж.мин} \tau \beta \cdot 10^{-3}; \\ Z_{тр.мин} = (E + p_a)K_{тр.мин} + 3I^2 R_{тр.мин} \tau \beta \cdot 10^{-3}, \end{cases}$$

где  $K_{зж.мин}$  и  $K_{тр.мин}$ ;  $R_{тр.мин}$  и  $R_{зж.мин}$  – значения капиталовложений и сопротивлений для трех- и одножильных кабельных линий, при которых обеспечивается минимум приведенных затрат.

Значение  $I_{гр}$  может быть определено с помощью Excel. Для этого нужно рассчитать значения затрат при различных величинах расчетного тока  $\sqrt{\sigma_{макс}}$  и  $\sqrt{\sigma_{мин}}$ . С помощью функции «поиск решения» можно найти значение тока, при котором выполняется равенство  $Z_{зж.мин} = Z_{тр.мин}$ . На рис. 3 представлена номограмма экономических интервалов выбора оптимальных сечений жил для трех- и одножильных кабелей, прокладываемых треугольником.

Красная линия на номограмме указывает на границу экономической целесообразности перехода от трехжильных кабелей к одножильным. Выше красной линии указаны сечения жил для одножильных кабелей, ниже – для трехжильных. Горизонтальные линии на номограмме указывают на ограничение в виде длительно допустимого тока нагрузки жилы кабеля, рассчитанного в соответствии с [28–30]. Сплошные линии соответствуют удельному тепловому сопротивлению грунта 1,2 К·м/Вт, а штриховые – 1,8 К·м/Вт.

Номограмма экономических интервалов показывает, что ограничение в виде длительно допустимого тока может требовать увеличения сечения относительно экономического тока. Этот факт указывает на то, что целесообразно повышать допустимую токовую нагрузку жил кабелей с точки зрения экономичности. Но при этом требуется не повышать капиталовложения на сооружение кабельной линии.

Использование трехжильных кабелей сечением 95 и 400 мм<sup>2</sup> оказалось нецелесообразным. Аналогичная ситуация наблюдалась и для кабелей



с бумажно-масляной изоляцией [17]. Это происходит в зависимости от распределения цен и сопротивлений жил между соседними сечениями кабелей из номинального ряда.

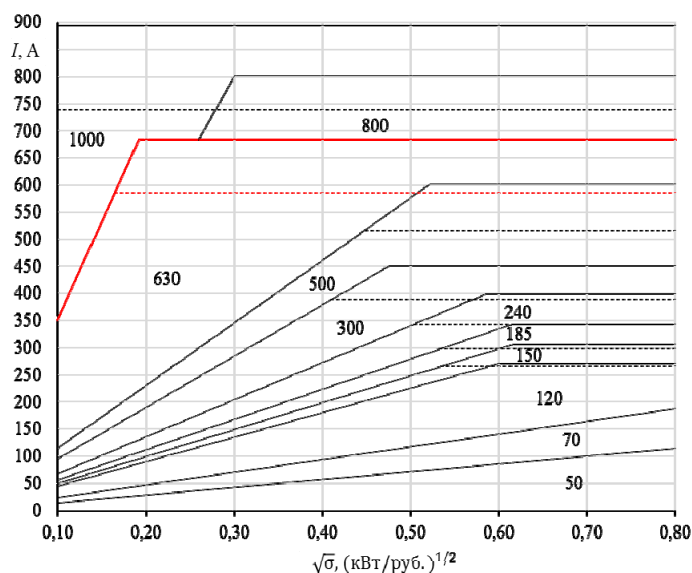


Рис. 3. Номограмма экономических интервалов для выбора сечения и конструкции кабельной линии

Fig. 3. Nomogram of economic intervals for selecting the section and construction arrangement of the cable line

Из рис. 3 видно, что если трехжильные кабели изготавливаются с максимальным сечением 630 мм<sup>2</sup>, одножильные кабели могут быть экономичны лишь при сечении жил 800 мм<sup>2</sup> и выше. До определенного значения токовой нагрузки приведенные затраты для кабельной линии с трехжильным кабелем остаются ниже, чем с одножильными кабелями. Однако при превышении этого порогового значения тока доля затрат, связанных с потерями электроэнергии, становится более существенной для трехжильных кабелей. В таких условиях, несмотря на более высокие капитальные затраты, одножильные кабели оказываются экономически выгоднее. Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод о целесообразности производства трехжильных кабелей с максимально возможным сечением. Увеличение максимального изготавливаемого сечения трехжильных кабелей позволит расширить диапазон токовых нагрузок, в котором их применение будет экономически оправдано, и сократить потребность в использовании более дорогостоящих одножильных кабелей.

#### ВЫВОДЫ

1. Комплексный подход к выбору конструкции кабельной линии 10 кВ, учитывающий как капитальные затраты, так и ежегодные издержки, включая потери электроэнергии в экранах кабелей, позволяет достичь опти-

мального технико-экономического решения. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных результатов в виде номограмм и методики при проектировании кабельных линий 10 кВ для выбора экономически обоснованных вариантов конструкции.

2. Приведенные затраты на прокладку одножильных кабелей в плоскости при двухстороннем заземлении экранов всегда оказываются больше, чем приведенные затраты на прокладку треугольником за счет увеличения капиталовложений и издержек на потери электроэнергии в экранах.

3. Построена граница экономической целесообразности применения трех- или одножильных кабелей в зависимости от расчетной токовой нагрузки. При номенклатуре трехжильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, производимых с максимальным сечением жилы до 630 мм<sup>2</sup>, одножильные кабели могут быть экономичны только с сечением жил 800 мм<sup>2</sup> и выше. При этом для повышения экономичности кабельных линий стоит изготавливать трехжильные кабели с как можно большим сечением.

4. Представленные в статье результаты носят универсальный характер и могут найти применение не только при проектировании новых кабельных линий, но и при анализе эффективности существующих, а также модернизации и реконструкции городских кабельных сетей среднего напряжения. Это будет способствовать повышению экономичности их эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Liu, C. Comparison and Selection of Three-Core Cable and Single-Core Cable / C. Liu // IOP conference series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 300, No. 4. Art. 042047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/4/042047>.
2. Дмитриев, М. В. Однофазные кабели КЛ 6–500 кВ. Выбор взаимного расположения / М. В. Дмитриев // Новости электротехники. 2018. № 5–6. С. 48–51.
3. The Effect of the Vertical Layout on Underground Cable Current Carrying Capacity / A. Ozyesil [et al.] // Energies. 2024. Vol. 17, No 3. P. 674. <https://doi.org/10.3390/en17030674>.
4. Cichy, A. Economic Optimization of an Underground Power Cable Installation / A. Cichy, B. Sakowicz, M. Kaminski // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33, No 3. P. 1124–1133. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2728702>.
5. Cichy, A. Detailed Model for Calculation of Life-Cycle Cost of Cable Ownership and Comparison with the IEC Formula / A. Cichy, B. Sakowicz, M. Kaminski // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 154. P. 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.009>.
6. Multiobjective Optimization of Underground Power Cable Systems / P. Ocloń [et al.] // Energy. 2021. Vol. 215. Art. 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
7. Optimization of Ampacity in High-Voltage Underground Cables with Thermal Backfill Using Dynamic PSO and Adaptive Strategies / B. A. Atocsa [et al.] // Energies. 2024. Vol. 17, No 5. P. 1023. <https://doi.org/10.3390/en17051023>.
8. Czapp, S. Optimization of Thermal Backfill Configurations for Desired High-Voltage Power Cables Ampacity / S. Czapp, F. Ratkowski // Energies. 2021. Vol. 14, No 5. Art. 1452. <https://doi.org/10.3390/en14051452>.
9. Короткевич, М. А. О целесообразности прокладки вне населенных пунктов кабельных линий электропередачи напряжением 6–35 кВ вместо воздушных / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 463–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-463-476>.

10. Сазонов, П. А. Преимущества применения трехжильного кабеля в сетях среднего напряжения / П. А. Сазонов, А. М. Короткевич // Энергетическая стратегия. 2023. № 6. С. 20–24.
11. Czapp, S. Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables—Case Study / S. Czapp, D. Krzysztof // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No 19. Art. 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
12. Подгайский, С. И. Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. И. Подгайский; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2022. 154 с.
13. Дмитриев, М. В. Кабельные линии высокого напряжения / М. В. Дмитриев. СПб.: Политех-пресс, 2021. 688 с.
14. Gouda, O. E. Factors Affecting the Sheath Losses in Single-Core Underground Power Cables with Two-Points Bonding Method / O. E. Gouda, A. A. Farag // International Journal of Electrical & Computer Engineering. 2012. Vol. 2, No 1. <https://doi.org/10.11591/ijece.v2i1.115>.
15. Высоцкий, М. Э. Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения / М. Э. Высоцкий // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 4. С. 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314>.
16. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети: учеб. / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. Минск: УП «Технопринт», 2004. 720 с.
17. Блок, В. М. Электрические сети и системы / В. М. Блок. М.: Высш. шк., 1986. 430 с.
18. Герасименко, А. А. Электрические системы и сети: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов-на-Дону: Феникс, 2023. 473 с.
19. Calculation of the Current Rating. Part 3–2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size: IEC 60287-3-2:2012 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/22c648b0-31da-4b8b-a73c-90355e4d7914/iec-60287-3-2-2012>.
20. Козлов, В. А. Электроснабжение городов / В. А. Козлов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. 264 с.
21. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей: учеб. / М. А. Короткевич. 2-е изд., испр. и доп. Минск: Вышэйш. шк., 2014. 350 с.
22. Короткевич, М. А. Монтаж электрических сетей: учеб. пособие / М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2012. 512 с.
23. Кабели силовые РОСКАБ [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rscable.ru/catalog/kabeli\\_silovye/](https://rscable.ru/catalog/kabeli_silovye/). Дата доступа: 06.08.2024.
24. Альбом материалов для проектирования и рабочие чертежи № 1.105.03тм. Прокладка силовых кабелей напряжением до 10 кВ в траншеях [Электронный ресурс]. Введ. 26.09.2019. Минск: ГПО «Белэнерго», 2019. Режим доступа: <https://energodoc.by/js/pdfjs/web/viewer.html?file=/file/fulltext-view/7167.pdf>.
25. Единые нормы и расценки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://belenir.com/enir/sbor>. Дата доступа: 23.05.2024.
26. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. 4-е изд., стер. М.: Кнорус, 2014. 648 с.
27. Ефентьев, С. Н. Развитие методики технико-экономического анализа при выборе основных параметров электрических сетей с учетом неопределенности исходной информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. Н. Ефентьев. М., 2004. 205 с.
28. Electric cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses General: IEC 60287-1-1:2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
29. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance: IEC 60287-2-1:2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.

30. Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV). Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV): IEC 60502-2:2014 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.

Поступила 19.08.2024 Подписана в печать 21.10.2024 Опубликована онлайн 29.11.2024

#### REFERENCES

1. Liu C. (2019) Comparison and Selection of Three-Core Cable and Single-Core Cable. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 300 (4), 042047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/4/042047>.
2. Dmitriev M. (2018) Single Core 6-500 kV Cables. Mutual Positioning. *Electrical Engineering News*, (5–6), 48–51 (in Russian).
3. Ozyesil A., Altun, B., Demiroglu Y. B., Alboyaci, B. (2024) The Effect of the Vertical Layout on Underground Cable Current Carrying Capacity. *Energies*, 17 (3), 674. <https://doi.org/10.3390/en17030674>.
4. Cichy A., Sakowicz B., Kaminski, M. (2018) Economic Optimization of an Underground Power Cable Installation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33 (3), 1124–1133. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2017.2728702>.
5. Cichy A., Sakowicz B., Kaminski M. (2018) Detailed Model for Calculation of Life-Cycle Cost of Cable Ownership and Comparison with the IEC Formula. *Electric Power Systems Research*, 154, 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.009>.
6. Ocloń P., Rerak M., Rao R. V., Cisek P., Vallati A., Jakubek D., Rozegnal B. (2020) Multi-objective Optimization of Underground Power Cable Systems. *Energy*, 215, 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
7. Atocsa B. A., Puma D. W., Mendoza D., Urday E., Ronceros C., Palma M. T. (2024) Optimization of Ampacity in High-Voltage Underground Cables with Thermal Backfill Using Dynamic PSO and Adaptive Strategies. *Energies*, 2024, 17 (5), 1023. <https://doi.org/10.3390/en17051023>.
8. Czapp S., Ratkowski F. (2021) Optimization of Thermal Backfill Configurations for Desired High-Voltage Power Cables Ampacity. *Energies*, 14 (5), 1452. <https://doi.org/10.3390/en14051452>.
9. Korotkevich M. A., Podgaisky S. I. (2022) On the Expediency of Laying Cable Power Lines with a Voltage of 6–35 kV Outside Settlements Instead of Overhead Power Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 463–476. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-463-476> (in Russian).
10. Sazonov P. A., Korotkevich A. M. (2023) Advantages of Using a Three-Core Cable in Medium Voltage Networks. *Energeticheskaya strategiya*, (6), 20–24 (in Russian).
11. Czapp S., Dobrzynski K. (2020) Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables. *Applied Sciences*, 10 (19), 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
12. Podhaiskii S. I. (2022) *Power Electric Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation* [dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University (in Russian).
13. Dmitriev M. V. (2021) *High Voltage Cable Lines*. St. Petersburg, Polytekhn-Press Publ. 688 (in Russian).
14. Gouda O. E., Farag A. A. (2011). Factors Affecting the Sheath Losses in Single-Core Underground Power Cables with Two-Points Bonding Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2 (1). <https://doi.org/10.11591/ijece.v2i1.115>.
15. Vysotski M. E. (2004) Long-Term Permissible Load Currents of Single-Core Cables with a Voltage of 10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation of Various Designs. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314> (in Russian).

16. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. (2004) *Electrical Systems and Networks*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 720 (in Russian).
17. Blok V. M. (1986) *Electrical Networks and Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 430 (in Russian).
18. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2023) *Electrical Systems and Networks*. Rostov-on-Don, Feniks Publ. 473 (in Russian).
19. IEC 60287-3-2:2012. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating – Part 3-2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/22c648b0-31da-4b8b-a73c-90355e4d7914/iec-60287-3-2-2012>.
20. Kozlov V. A. (1988) *Power Supply of Cities*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 264 (in Russian).
21. Korotkevich M. A. (2014) *Operation of Electric Networks*. 2<sup>nd</sup> ed. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 350 (in Russian).
22. Korotkevich M. A. (2012) *Installation of Electrical Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 512 (in Russian).
23. *ROSKAB Power Cables*. Available at: [https://rscable.ru/catalog/kabeli\\_silovye/](https://rscable.ru/catalog/kabeli_silovye/) (accessed 08 Juny 2024) (in Russian).
24. *Materials for Design and Working Drawings Arch. No. 1.105.03tm. Laying of Power Cables with a Voltage of up to 10 kV in Trenches*. Minsk, SIA “Belenergo”, 2019. Available at: <https://energodoc.by/js/pdfjs/web/viewer.html?file=/file/fulltext-view/7167.pdf> (in Russian).
25. *Uniform Standards and Prices*. Available at: <https://belenir.com/enir/sbor> (accessed 23 May 2024) (in Russian).
26. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2014) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Knorus Publ. 648 (in Russian).
27. Efentiev S. N. (2004) Development of the Methodology of Technical and Economic Analysis in the Selection of the Main Parameters of Electric Networks, Taking into Account the Uncertainty of the Initial Information [dissertation]. Moscow (in Russian).
28. IEC 60287-1-1:2023. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses – General*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
29. IEC 60287-2-1:2023. *Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
30. IEC 60502-2:2014. *Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV). Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV)*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.

Received: 19 August 2024

Accepted: 21 October 2024

Published online: 29 November 2024