

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-128-139>

УДК 621.315.2

Определение оптимальных параметров грунтовой засыпки при прокладке силовых кабельных линий

М. Э. Высоцкий¹⁾

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

Реферат. В данной статье рассмотрена проблема технико-экономической эффективности применения материалов с повышенной теплопроводностью при засыпке траншеи силовых кабельных линий. Удельное тепловое сопротивление грунта существенно влияет на допустимые токи кабелей и, как следствие, на выбор их сечения. При высыхании грунта или его изначально высоком тепловом сопротивлении пропускная способность проводников снижается, что зачастую вынуждает использовать кабели большего сечения для обеспечения требуемого тока нагрузки. Одним из способов улучшения условий охлаждения является применение специальной, более дорогой по сравнению с грунтовой, засыпки с пониженными значениями теплового сопротивления. Тогда встает вопрос о технико-экономической целесообразности такого решения, поскольку более дорогой материал может не оправдать себя в ряде случаев. Предложена методика оптимизации, основанная на вычислении приведенных затрат, учитывающих стоимость кабеля, строительство линий и эксплуатационные расходы. Разработанная модель учитывает влияние как нормального, так и послеаварийного режимов работы. Показано, что повышение пропускной способности за счет специальной засыпки может позволить снизить сечение кабеля на одну ступень и, таким образом, компенсировать затраты на более дорогой материал. В противном случае применение специальных засыпок становится нецелесообразным. Для решения оптимизационной задачи использован генетический алгоритм, реализованный в среде MS Excel. Приведены результаты расчетных примеров, показывающих, что предлагаемая методика и алгоритм могут использоваться для различных напряжений и условий прокладки, позволяя проектировщику выбрать эффективные параметры конструкции кабельной линии.

Ключевые слова: силовой кабель, пропускная способность, удельное тепловое сопротивление засыпки, технико-экономическая оптимизация, генетический алгоритм

Для цитирования: Высоцкий, М. Э. Определение оптимальных параметров грунтовой засыпки при прокладке силовых кабельных линий / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 128–139. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-128-139>

Determination of Optimal Parameters of the Ground Filling During the Laying of Power Cable Lines

M. E. Vysotski¹⁾

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

Abstract. The present article discusses the problem of the technical and economic efficiency of using materials with increased thermal conductivity when filling trenches of power cable lines.

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

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

The specific thermal resistance of the soil significantly affects the permissible cable currents and, as a result, the choice of their cross-section. When the soil dries out or it is initially of high thermal resistance, the carrying capacity of the conductors decreases, which often forces the use of cables with a larger cross-section to provide the required load current. One of the ways to improve cooling conditions is to use a special backfill with lower thermal resistance values, which is more expensive than the ground one. This raises the question of the feasibility of such a solution, since more expensive materials may not pay off in some cases. An optimization technique is proposed based on the calculation of reduced costs, taking into account the cost of cable, line construction and operating costs. The model that has been developed takes into account the influence of both normal and post-emergency operation modes. It is shown that increasing the cable current capacity due to special backfilling can reduce the cable cross-section by one step and, thus, compensate for the cost of more expensive material. Otherwise, the use of special backfills becomes impractical. To solve the optimization problem, a genetic algorithm implemented in the MS Excel environment was used. The results of calculation examples are presented, showing that the proposed methodology and algorithm can be used for various voltage and laying conditions, allowing the designer to select effective parameters of the cable line design.

Keywords: силовой кабель, пропускная способность, удельное тепловое сопротивление засыпки, технико-экономическая оптимизация, генетический алгоритм

For citation: Vysotski M. E. (2025) Determination of Optimal Parameters of the Ground Filling During the Laying of Power Cable Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 128–139. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-128-139> (in Russian)

Введение

Удельное тепловое сопротивление грунта оказывает существенное влияние на длительно допустимые токи жил силовых кабелей, прокладываемых в грунте [1–7]. На удельное тепловое сопротивление грунта существенно влияют его тип и влажность. Высыхание грунта вокруг кабеля под действием тепловыделения может приводить к снижению пропускной способности кабеля. Удельное тепловое сопротивление песка во влажном состоянии может составлять порядка 0,8–1,2 К·м/Вт, а в сухом состоянии составляет 2–3 К·м/Вт. Поэтому представляется целесообразным использовать для засыпки траншеи кабельной линии материалы с улучшенными тепловыми характеристиками.

Существующие исследования по использованию материалов для обратной засыпки траншеи силовых кабелей можно разделить на группы: работы, направленные на минимизацию капиталовложений [8–11], и работы, ориентированные на минимизацию суммарных затрат за цикл эксплуатации [12, 13]. При этом ток жилы кабеля может приводиться к заданной величине [8–10] или поддерживаться не выше допустимого тока по нагреву [12, 13]. Однако в указанных работах не дается однозначного ответа на вопрос об экономической целесообразности применения материалов для засыпки с повышенной теплопроводностью.

В данной статье предлагается методика оптимизации конфигурации кабельной линии для минимизации приведенных затрат при обеспечении требуемой пропускной способности. Рассматривается случай, когда минимизируются приведенные затраты при условии удовлетворения требований по предельно допустимому нагреву кабельной линии в нормальном и по-

слеаварийном режимах. Определяются условия экономической целесообразности применения засыпок с повышенной теплопроводностью. Описывается реализация генетического алгоритма оптимизации, встроенного в среде MS Excel. В отличие от предыдущих исследований, в которых использование специальных засыпок с повышенной теплопроводностью представляется само собой разумеющимся, данная методика позволяет количественно оценить технико-экономические показатели кабельной линии как с обычной, так и с засыпкой с повышенной теплопроводностью и обоснованно выбрать наилучший вариант.

Приведенные затраты на сооружение силовой кабельной линии

Сечения жил кабелей должны выбираться прежде всего исходя из экономических соображений. Экономичным считается решение, соответствующее минимуму приведенных затрат. Наряду с требованием экономичности, сечения кабелей должны удовлетворять ряду технических ограничений [14]. По экономическим критериям дополнительные капиталовложения в виде засыпки с повышенной теплопроводностью могут быть оправданы только при условии, что из-за этих дополнительных капиталовложений не увеличатся приведенные затраты:

$$Z = (E + p_a)K + 3I_p^2 R \tau \beta \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где K – стоимость линии, руб./км; E – нижняя граница эффективности капиталовложений, принимаемая не ниже ставки за предоставление кредита или за хранение средств в банке [15]; p_a – коэффициент отчислений на амортизацию, $p_a = 0,033$; I_p – расчетный ток линии, А; $R = R'(1 + y_s + y_p)(1 + \lambda_1 + \lambda_2)$ – эквивалентное электрическое сопротивление кабеля [16], Ом/км; τ – эквивалентное время максимальных потерь; β – тариф на электроэнергию в электрической сети, руб./(кВт·ч).

Капиталовложения на сооружение кабельной линии могут быть представлены в виде [17]

$$K = C_k + C_n,$$

где C_k – стоимость кабеля и муфт, руб./км; C_n – стоимость сооружения кабельной линии, руб./км.

Стоимость сооружения кабельной линии на один километр в траншее

$$C_n = (h - x)yl \cdot C_1 + xyl \cdot C_2 + C_3 + C_4 + \\ + xyl \cdot C_5 + (h - x)yl \cdot C_6 + xyl \cdot C_7 + C_8,$$

где l – длина траншеи (принятая 1 км), м; C_1 – стоимость разработки грунта в отвал экскаваторами, руб./м³; C_2 – то же разработки грунта с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами, руб./м³; 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 засыпки, руб./м³; C_6 – то же засыпки траншеи бульдозерами и работы на отвале, руб./м³; C_7 – то же вывоза грунта на полигон, руб./м³; C_8 – то же монтажа термоусаживаемых муфт кабелей напряжением 10 кВ, руб./шт.

В настоящее время для засыпки кабельных траншей применяются различные теплопроводные материалы [4, 8]:

– песчано-цементная смесь в пропорции 1 к 10 или 1 к 12 с удельным тепловым сопротивлением в сухом состоянии $\rho_c = 1,0 \text{ К} \cdot \text{м/Вт}$ и стоимостью около 20 евро/м³;

– FTB (Fluidized Thermal Backfill) – смесь песка, воды, цемента и золы с $\rho_c = 0,6 \text{ К} \cdot \text{м/Вт}$ и стоимостью 125 евро/м³;

– POWERCRETE – специальная смесь компании Heidelberg Cement Group [18] с $\rho_c = 0,3 \text{ К} \cdot \text{м/Вт}$ и стоимостью 250 евро/м³.

Цена на песок или песчано-гравийную смесь в Республике Беларусь составляет около 8 евро/м³.

Пропускная способность силовой кабельной линии

Идеальным с точки зрения экономии будет случай, когда никакие технические критерии не завысили площадь поперечного сечения, определенную по экономическому критерию. Но для электрической сети при выборе сечения проводников это условие может не соблюдаться.

Сечение жил должно удовлетворять требованиям предельного длительно допустимого нагрева:

– в нормальном режиме допустимый ток должен удовлетворять условию

$$I_{\text{доп}} \geq I_p, \quad (2)$$

где $I_{\text{доп}}$ – длительно допустимый ток токопроводящей жилы кабеля; I_p – расчетный ток линии нормального режима;

– в послеаварийном режиме должно удовлетворяться условие

$$I_{\text{доп}} \geq I_{p \text{ а}} = \frac{I_p \cdot k_{\text{ап}}}{k_{\text{пер}}}, \quad (3)$$

где $I_{p \text{ а}}$ – расчетный ток линии аварийного режима; $k_{\text{пер}}$ – допустимый коэффициент перегрузки для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена для прокладки: в земле – 17 %, в воздухе – 20 %, при этом не более 8 ч в сутки для кабелей напряжением 10 кВ и не более 1000 ч за срок службы [19]; $k_{\text{ап}}$ – коэффициент увеличения расчетной нагрузки в аварийном режиме, зависящий от конфигурации электрической сети.

Для оценки влияния удельного теплового сопротивления грунта и засыпки на допустимые токи кабелей использована методика [20, 21]. Длительно допустимый ток определяется по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + nT_3 + T_4]}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)T_2 + R(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}, \quad (4)$$

где $\Delta\theta$ – превышение температуры жилы кабеля над средней температурой окружающей среды, °С; W_d – диэлектрические потери в изоляции, Вт/м; n – количество жил в кабеле; R – сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины кабеля при максимальной рабочей температуре, Ом/м; λ_1, λ_2 – отношение потерь мощности в экране и броне соответственно к общим потерям в жилах кабеля; T_1, T_2, T_3, T_4 – тепловое сопротивление изоляции, подушки, оболочки, окружающей среды, К·м/Вт.

Значение T_4 вычисляется:

– для трех однофазных кабелей, расположенных треугольником вплотную, имеющих экран из медных проволок, когда удельное тепловое сопротивление засыпки и окружающего грунта одинаковое:

$$T_4 = \frac{\rho_e}{2\pi} [\ln(2u) + 2\ln(u)]; \quad (5)$$

– для трехжильного кабеля, когда удельное тепловое сопротивление засыпки и окружающего грунта одинаковое:

$$T_4 = \frac{\rho_e}{2\pi} \ln(2u); \quad (6)$$

– при различных удельных тепловых сопротивлениях грунта и засыпки соответственно:

$$T_4 = \frac{\rho_c}{2\pi} [\ln(2u) + 2\ln(u)] + \frac{N_c}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \cdot G_b; \quad (7)$$

$$T_4 = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln(2u) + \frac{N_c}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \cdot G_b. \quad (8)$$

В (5) и (6) u вычисляется по формуле

$$u = \frac{2L}{d}; \quad (9)$$

в (7) и (8) – по формуле

$$u = \frac{L_G}{r_b}; \quad (10)$$

Эквивалентный радиус засыпки r_b и геометрический фактор G_b вычисляются по формулам:

$$r_b = \exp \left[\frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{x^2}{y^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \right]; \quad (11)$$

$$G_b = \ln \left(\frac{2L_g}{r_b} \right), \quad (12)$$

где ρ_e – удельное тепловое сопротивление грунта К·м/Вт; ρ_c – удельное тепловое сопротивление засыпки, К·м/Вт; L – расстояние от поверхности земли до оси кабеля, мм; L_g – глубина прокладки до центра засыпки, мм; N_c – число нагруженных кабелей; x – короткая сторона засыпки, мм; y – длинная сторона засыпки, мм.

Формула (11) применима только при соотношении $y/x \leq 3$. В [22] представлены значения геометрического фактора для иных геометрических соотношений засыпки.

Минимум приведенных затрат с учетом ограничения по пропускной способности

Целесообразность применения специальной засыпки определяется тем, влечет ли это снижение приведенных затрат по сравнению с вариантом обычной засыпки. Если за счет повышения пропускной способности кабеля удастся выбрать сечение жил на ступень меньше, чем требовалось бы без специальной засыпки, то дополнительные капиталовложения в засыпку могут быть оправданы экономией на стоимости кабеля. В противном случае более выгодным будет вариант с обычной засыпкой и кабелем большего сечения. Иначе говоря, если экономическая плотность тока для кабельной линии с обычной засыпкой была выше, чем длительно допустимая плотность тока по нагреву, то использование специальной подсыпки нецелесообразно.

Рассмотрим на примере кабельной линии напряжением 110 кВ (рис. 1) график зависимости минимума приведенных затрат от тока линии для разных сечений жил при площади поперечного сечения экрана 120 мм² и двустороннем заземлении экрана (при $E = 0,1$; $\tau = 2000$ ч; $\rho_e = 1,8$ К·м/Вт). График построен для случая, когда расчетный ток линии аварийного режима в 1,5 раза больше тока нормального режима, для песчаной засыпки и песчано-цементной засыпки с $\rho_e = 1,0$ К·м/Вт.

График имеет ступенчатый вид, поскольку для данных расчетных условий получалось, что длительно допустимая плотность тока по нагреву была ниже экономической плотности тока и соответственно требовалось повысить сечение, чтобы удовлетворить требованию по условию нагрева.

Из графика видно, что на расчетных токах до 600 А засыпка повышает приведенные затраты, а далее она может позволять уменьшать приведен-

ные затраты. Для случая, выделенного красным цветом, приведенные затраты уменьшаются на 4 %. В этой ситуации применение песчано-цементной засыпки позволило использовать сечение жил 800 мм^2 вместо 1000 мм^2 , что требовало ограничение пропускной способности.

Поскольку на технико-экономические показатели кабельной линии влияет большое количество факторов, построение подобных графиков для всех возможных вариантов не представляется рациональным. Поэтому целесообразно использовать алгоритм оптимизации, который для конкретных исходных данных позволит найти решение, обеспечивающее минимум приведенных затрат при выполнении технических ограничений.

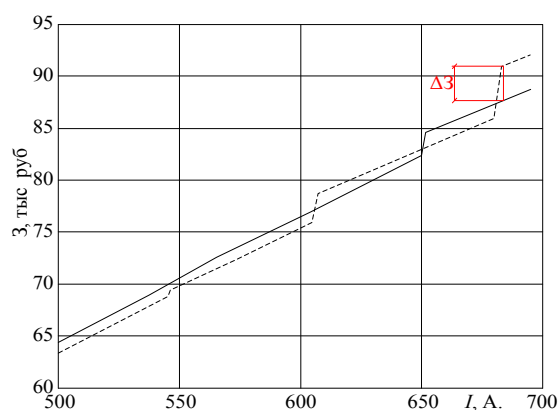


Рис. 1. Зависимость приведенных затрат для линии 110 кВ с одножильными кабелями, проложенными треугольником, с засыпкой: песчано-цементной смесью (сплошные линии); песком или песчано-гравийной смесью (штриховые линии)

Fig. 1. Dependence of the reduced costs for a 110 kV line with single-core cables laid in a triangle, filled with: sand-and-cement mixture (solid lines); sand or sand-and-gravel mixture (dashed lines)

Алгоритм оптимизации

Задачу оптимизации параметров кабельной линии можно сформулировать следующим образом: найти значения площади поперечного сечения жил, материал и геометрические размеры засыпки, обеспечивающие минимум целевой функции приведенных затрат (1) при условии выполнения ограничений по длительно допустимому току в нормальном (2) и послеаварийном режимах (3).

Данная задача характеризуется нелинейностью целевой функции, наличием дискретных переменных (стандартные сечения жил, тип засыпки и ее габариты), а также большим количеством влияющих факторов. Для ее эффективного решения целесообразно использовать методы, позволяющие находить глобальный экстремум в условиях сложного характера зависимостей, таких как генетический алгоритм [23]. Этот метод успешно применяется в задачах оптимизации электроэнергетики [24] и доступен через встроенный в Excel инструмент Solver [25, 26].

Генетический алгоритм представляет собой эвристический метод многомерной оптимизации, основанный на концепциях естественного отбора и генетики. Его суть состоит в случайной генерации множества возможных решений, оценке значения целевой функции и формировании новых решений на основе наилучших предыдущих решений. Процесс продолжается до достижения заданного числа решений или сходимости алгоритма.

Для оптимизации конфигурации кабельной линии с помощью генетического алгоритма в надстройке Solver MS Excel необходимо выполнить следующие шаги:

1. Ввести исходные данные: электрические, тепловые, геометрические и стоимостные показатели кабельной линии для всего номинального ряда сечений жил кабелей.

2. Сформировать целевую ячейку для минимизации приведенных затрат по формуле (1) и ограничений по допустимому нагреву в виде (2) и (3).

3. Задать диапазоны изменения оптимизируемых переменных: дискретного ряда стандартных сечений жил кабеля (например, {95, 120, ..., 1000} мм²); типа засыпки, также ее толщины (например, $x = 0,2-0,5$ м) и ширины (например, $y = 0,3-0,5$ м).

4. Вызвать надстройку Solver и установить ее параметры: целевая ячейка – минимизация приведенных затрат; изменяемые ячейки – площадь сечения жил, размеры засыпки и ее тепловое сопротивление; ограничения – длительно допустимые токи в нормальном и послеаварийном режимах не меньше расчетных значений; параметры эволюционного алгоритма: тип модели – Evolutionary; сходимость – 0,00001.

5. Запустить алгоритм. В ходе его работы случайным образом генерируются варианты решений, из которых отбираются лучшие по критерию минимума целевой функции при выполнении ограничений. Поиск продолжается до нахождения глобального оптимума.

6. Проанализировать полученное решение. Из отчета Solver определить оптимальные значения площади сечения жил кабеля, геометрических параметров засыпки и ее удельного теплового сопротивления, обеспечивающие минимум приведенных затрат.

Пример результатов предложенного алгоритма для трехжильного кабеля напряжением 10 кВ при следующих исходных данных: $I_p = 300$ А; $I_{pa} = 450$ А; $E = 0,1$; $\tau = 2000$ ч; $\beta = 0,24$ руб./(кВт·ч); $\rho_e = 3,0$ К·м/Вт; $\rho_c = 1,0$ К·м/Вт. Оптимальным оказалось использование кабеля с сечением жилы 500 мм² с засыпкой из песчано-цементной смеси: $I_{доп} = 450$ А; $Z = 20335$ руб. При применении обычной подсыпки требуется использовать жилу 630 мм² с $I_{доп} = 474$ А; $Z = 20359$ руб. То есть затраты оказались практически равнозначными. Если рассматривать $\rho_e = 1,8$ К·м/Вт, то наименьшей по приведенным затратам оказывается песчаная засыпка с кабелем сечением жилы 400 мм² ($I_{доп} = 456$ А; $Z = 20230$ руб.).

Целесообразность применения специальной засыпки определяется следующими основными факторами:

– значением расчетного тока линии в нормальном и послеаварийном режимах. Если повышение пропускной способности кабеля за счет улучшения условий охлаждения позволяет выбрать сечение жил на ступень меньше по сравнению с вариантом обычной (песчаной) засыпки, то дополнительные затраты на засыпку могут быть оправданы экономией на стоимости кабеля;

– стоимостью кабельной линии и засыпки. Чем выше стоимость кабеля, тем вероятнее, что расходы на специальную засыпку оправдаются благодаря возможности применить кабель меньшего сечения;

– удельным тепловым сопротивлением грунта и засыпки. Использование специальной засыпки более целесообразно при высоких значениях теплового сопротивления грунта, когда ее применение обеспечивает существенное улучшение условий охлаждения кабеля. При хорошо проводящем теплоту грунте выигрыш в пропускной способности будет меньше и может не оправдать дополнительных капиталовложений.

Расчеты для кабельных линий напряжением 10 и 110 кВ показали, что использование более дорогих материалов с повышенной теплопроводностью часто оказывается экономически нецелесообразным, так как в большинстве случаев экономический эффект не превышал 5 %. Во многих примерах применение таких материалов попросту невыгодно.

Важным остается вопрос о выборе значения удельного теплового сопротивления грунта для конкретной кабельной линии, поскольку именно оно в значительной мере определяет пропускную способность кабеля.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика технико-экономической оптимизации конфигурации кабельной линии, позволяющая определить условия целесообразности применения засыпок с повышенной теплопроводностью для минимизации приведенных затрат при обеспечении требуемой пропускной способности.

2. Разработан алгоритм оптимизации на основе генетического метода, реализованный в среде MS Excel. Алгоритм позволяет определять оптимальные значения сечения жил кабеля и параметров засыпки, обеспечивающие минимум приведенных затрат при выполнении ограничений по допустимому нагреву.

3. Эффективность применения засыпок с повышенной теплопроводностью значительно зависит от значения расчетного тока кабельной линии, стоимости кабеля и засыпки, удельного теплового сопротивления грунта. Расчеты для кабельных линий 10 и 110 кВ продемонстрировали, что в большинстве случаев такие материалы экономически невыгодны. При наличии положительного экономического эффекта он, как правило, не превышал 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weedy, B. *Underground Transmission of Electric Power* / B. Weedy. New York : John Wiley and Sons. 1980. 232 p.
2. Бронгулеева, М. Н. Кабельные линии высокого напряжения / М. Н. Бронгулеева, С. С. Городецкий. Л.; М. : Госэнергоиздат, 1963. 512 с.
3. Anders, G. J. *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2005.
4. Ocloń, P. *Renewable Energy Utilization Using Underground Energy Systems*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2021. (Lecture Notes in Energy; vol. 84). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75228-6>.
5. Leon, F. de. Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method / F. de Leon, G. J. Anders // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. Vol. 23, No 2. P. 537–543. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917648>.
6. Gouda, O. E. Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground Power Cables on Their Ratings / O. E. Gouda, A. Z. El Dein, G. M. Amer // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011. Vol. 26, No 2. P. 972–978. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2060369>.
7. Gouda, O. E. Improving Underground Power Distribution Capacity Using Artificial Backfill Materials / O. E. Gouda, A. Z. El Dein // *IET Gener. Transm. Distrib.* 2015. Vol. 9, No 15. P. 2180–2187. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0274>.
8. Multiobjective Optimization of Underground Power Cable Systems / P. Ocloń, M. Rerak, R. V. Rao [et al.] // *Energy*. 2021. Vol. 215, Part B. Art. 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
9. Ocloń, P. Analysis of an Application Possibility of Geopolymer Materials as Thermal Backfill for Underground Power Cable System / P. Ocloń, P. Cisek, M. Matysiak. *Clean Techn Environ Policy*. 2021. Vol. 23. P. 869–878. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01942-8>.
10. Ocloń, P. The Effect of Soil Thermal Conductivity and Cable Ampacity on the Thermal Performance and Material Costs of Underground Transmission Line / P. Ocloń. *Energy*. 2021. Vol. 231. Art. 120803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120803>.
11. Czapp, S. Optimization of Thermal Backfill Configurations for Desired High-Voltage Power Cables Ampacity / S. Czapp, F. Ratkowski // *Energies*. 2021. Vol. 14. Art. 1452. <https://doi.org/10.3390/en14051452>.
12. 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>.
13. 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>.
14. Поспелов, Г. Е. *Электрические системы и сети: учеб.* / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. Минск: УП «Технопринт», 2004. 720 с.
15. Герасименко, А. А. *Электрические системы и сети : учеб. пособие для студ.* / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов-на-Дону: Феникс, 2023. 473 с.
16. Electric cables. Calculation of the Current Rating. Part 3–2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size : IEC 60287-3-2:2012. Geneva: IEC, 2012. 42 p.
17. 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>.
18. Heat-conducting Concrete // Heidelberg Materials. URL: <https://www.heidelbergmaterials.co.uk/en/ready-mixed-concrete/heat-conducting-concrete>.
19. Силовые кабельные линии напряжением 6–110 кВ. Нормы проектирования по прокладке кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена пероксидной сшивки: ТКП 611–2017. Минск : Мин-во энергетики Республики Беларусь, 2017. 103 с.

20. 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. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
21. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance: IEC 60287-2-1:2023. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
22. El-Kady, M. A. Extended Values for Geometric Factor of External Thermal Resistance of Cables in Duct Banks / M. A. El-Kady, D. J. Horrocks // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1985. Vol. PAS-104, № 8. P. 1958–1962. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318767>.
23. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик; под ред. В. М. Курейчика. 2-е изд., исправ. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 368 с.
24. Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма / А. М. Брамм, А. И. Хальясмаа, С. А. Ерошенко [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>.
25. Trautmann, N. On an application of Microsoft Excel's Evolutionary Solver to the Resource-constrained Project Scheduling Problem RCPSP / N. Trautmann, M. Gnägi // *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 2015. P. 646–650. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385727>.
26. Keisler, J. M. (2024). Optimization: Excel Solver / J. M. Keisler // *Prescriptive Analytics*. Springer Texts in Business and Economics. Springer, Cham, 2024. P. 221–246. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59353-6_10.

Поступила 16.12.2024 Подписана в печать 17.02.2025 Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Weedy B. (1980) *Underground Transmission of Electric Power*. New York, John Wiley and Sons. 232.
2. Bronguleeva M. N., Gorodetskii S. S. (1963) *High Voltage Cable Lines*. Leningrad; Moscow, Gosenergoizdat Publ. 512 (in Russian).
3. Anders G. J. (2005) *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
4. Oclon P. (2021) *Renewable Energy Utilization Using Underground Energy Systems. Lecture Notes in Energy. Vol. 84*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. 173 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75228-6>.
5. Leon F. de, Anders G. J. (2008) Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed with the Finite Element Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (2), 537–543. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917648>.
6. Gouda O. E., El Dein A. Z., Amer G. M. (2011) Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground Power Cables on Their Ratings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (2), 972–978. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2060369>.
7. Gouda O. E., El Dein A. Z. (2015) Improving Underground Power Distribution Capacity Using Artificial Backfill Materials. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 9 (15), 2180–2187. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0274>.
8. Ocloń P., Rerak M., Rao R. V., Cisek P., Vallati A., Jakubek D., Rozegnał B. (2021) Multi-objective Optimization of Underground Power Cable Systems. *Energy*, 215 (part B), 119089. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119089>.
9. Ocloń P., Cisek P., Matysiak M. (2021) Analysis of an Application Possibility of Geopolymer Materials as Thermal Backfill for Underground Power Cable System. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, 869–878. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01942-8>.
10. Ocloń P. (2021) The Effect of Soil Thermal Conductivity and Cable Ampacity on the Thermal Performance and Material Costs of Underground Transmission Line. *Energy*, 231, 120803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120803>.

11. 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>.
12. 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/TPWRD.2017.2728702>.
13. 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>.
14. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. (2004) *Electrical Systems and Networks*. Minsk, Technoprint Publ. 720 (in Russian).
15. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2023) *Electrical Systems and Networks*. Rostov-on-Don, Feniks Publ. 473 p. (in Russian).
16. IEC 60287-3-2:2012. *Calculation of the current rating. Part 3–2: Section on Operating Conditions – Economic Optimization of Power Cable Size*. Geneva, IEC, 2012. 42 p.
17. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (6), 488–500. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-488-500> (in Russian).
18. Heat-conducting Concrete. *Heidelberg Materials*. Available at: <https://www.heidelbergmaterials.co.uk/en/ready-mixed-concrete/heat-conducting-concrete>.
19. TKP 611-2017: *6-110 kV Power Cable Lines. Design Standards for Laying Cables Insulated with Cross-Linked Polyethylene Peroxide Crosslinking*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2017. 103 p. (in Russian).
20. 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>.
21. IEC 60287-2-1:2023. *Electric Cables – 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>.
22. El-Kady M. A., Horrocks D. J. (1985) Extended Values for Geometric Factor of External Thermal Resistance of Cables in Duct Banks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104 (8), 1958–1962. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318767>.
23. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. (2010) *Genetic Algorithms*. 2nd ed. Moscow, FIZMATLIT Publ. 368 (in Russian).
24. Bramm A. M., Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2022) Topology Optimization of the Network with Renewable Energy Sources Generation Based on a Modified Adapted Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354> (in Russian).
25. Trautmann N., Gnägi M. (2015) On an Application of Microsoft Excel's Evolutionary Solver to the Resource-Constrained Project Scheduling Problem RCPSp, *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 646–650. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385727>.
26. Keisler J. M. (2024) Optimization: Excel Solver. Prescriptive Analytics. *Springer Texts in Business and Economics*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59353-6_10.