

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-417-427>

УДК 621.315.2

Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий

Асп. М. Э. Высоцкий¹⁾

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

Реферат. Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий представляет собой комплексную инженерно-экономическую задачу, влияющую на эффективность, безопасность и экономичность эксплуатации электрических сетей. Существующие подходы часто основываются на отдельных технических или экономических критериях без их комплексного учета. Цель данной работы заключается в разработке методики выбора оптимальной схемы заземления экранов по критерию минимума приведенных затрат с учетом технических ограничений по наведенному напряжению и пропускной способности линии. В работе рассмотрены три основные схемы заземления (одно- и двустороннее, транспозиция), для которых рассчитывались капитальные затраты, ежегодные эксплуатационные издержки, наведенные токи и напряжение на экранах и длительно допустимые токи нагрузки кабелей. Определена предельная длина кабельной линии с односторонним заземлением по условию наведенного напряжения. Обозначены области применимости различных схем: одностороннее заземление применимо для линий малой длины (до 0,5–1,5 км в зависимости от площади поперечного сечения жил); двустороннее заземление оптимально для линий с небольшой токовой нагрузкой; транспозиция экранов рекомендуется для линий большой длины с относительно высокой токовой нагрузкой. Установлено, что переход от двустороннего заземления к одностороннему или транспозиции для кабелей напряжением 110 кВ увеличивает пропускную способность кабельной линии на 1–26 % в зависимости от площади поперечного сечения жилы и экрана. Актуальным представляется разработка программного обеспечения для автоматизации процесса выбора оптимальной схемы заземления экранов. Практическое применение разработанной методики позволяет оптимизировать технические решения при проектировании кабельных линий, сокращая капитальные и эксплуатационные затраты электрических сетей.

Ключевые слова: приведенные затраты, наведенное напряжение, длительно допустимый ток, одностороннее заземление, двустороннее заземление, транспозиция экранов

Для цитирования: Высоцкий, М. Э. Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 417–427. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-417-427>

Selecting a Grounding Scheme for Screens of Power Cable Lines

M. E. Vysotski¹⁾

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

Abstract. The choice of a grounding scheme for the screens of power cable lines is a complex engineering and economic task that affects the efficiency, safety and cost-effectiveness

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

of the operation of electrical networks. Existing approaches are often based on individual technical or economic criteria without taking them into account comprehensively. The purpose of this work is to develop a method for selecting the optimal grounding scheme for screens based on the criterion of minimum reduced costs, taking into account technical limitations on induced voltage and line capacity. The paper examines three basic grounding schemes (one-sided, two-sided, transposition), for which capital costs, annual operating costs, induced currents and voltage on the shields, and long-term permissible cable load currents were calculated. The maximum length of a cable line with one-sided grounding is determined based on the induced voltage condition. The areas of applicability of various schemes are indicated: one-sided grounding is applicable for short lines (up to 0.5–1.5 km depending on the cross-sectional area of the conductors); two-sided grounding is optimal for lines with a small current load; transposition of screens is recommended for long lines with a relatively high current load. It has been established that the transition from double-sided grounding to single-sided grounding or transposition for 110 kV cables increases the capacity of the cable line by 1–26 % depending on the cross-sectional area of the core and screen. The development of software to automate the process of selecting the optimal grounding scheme for screens seems relevant. The practical application of the developed methodology allows optimizing technical solutions in the design of cable lines, reducing capital and operating costs of electrical networks.

Keywords: reduced costs, induced voltage, continuous current, one-sided grounding, two-sided grounding, screen transposition

For citation: Vysotski M. E. (2025) Selecting a Grounding Scheme for Screens of Power Cable Lines // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 417–427. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-417-427> (in Russian)

Введение

Выбор схемы заземления экранов силовых кабельных линий представляет собой комплексную инженерно-экономическую задачу, решение которой оказывает существенное влияние на эффективность, безопасность и экономичность эксплуатации электрических сетей. При проектировании кабельных линий необходимо учитывать ряд критериев, связанных с заземлением экранов: обеспечение электробезопасности, контроль наведенного напряжения, предотвращение выноса потенциала заземляющего устройства, минимизацию потерь энергии в экранах, обеспечение термической стойкости экранов и максимальной пропускной способности линий. Эти факторы напрямую влияют как на технические характеристики кабельной линии, так и на экономические показатели.

Анализ существующих исследований в данной области показывает отсутствие комплексного подхода к выбору схемы заземления экранов.

В [1] выделяют три основных критерия выбора схемы заземления экрана: уровень наведенного напряжения, потери энергии и простоту технического решения. Однако такой подход не учитывает экономические аспекты выбора, что снижает его практическую ценность.

В [2] представляют широкий спектр способов заземления экранов силовых кабелей, включая одностороннее заземление (со стороны центра питания либо со стороны нагрузки), заземление с одной стороны и объединение с другой, двустороннее заземление, двустороннее заземление через резисторы, а также различные варианты с разделением и объединением экранов в средней точке. Данная классификация дает хорошую основу для систематизации схем заземления, но не предлагает методики выбора оптимального варианта.

Международные исследования также не предлагают единого подхода к выбору схемы заземления. Группа CIGRE [3] и стандарт IEEE [4] фокусируются на технических аспектах заземления экранов, не уделяя внимания экономическим критериям выбора.

В работе [5] предлагается выбор оптимальной схемы на основе сравнения стоимости потерянной электроэнергии при двустороннем заземлении экранов и стоимости сооружения транспозиции. Согласно данному подходу, транспозиция должна быть не более чем в пять раз дороже ежегодных издержек на потери электроэнергии при двустороннем заземлении. Однако такой метод является приближенным и не учитывает, что сечение жилы также должно выбираться, исходя из экономической целесообразности.

В [6, 7] предлагают критерий выбора, основанный на сравнении суммарных дополнительных затрат на разомкнутую систему заземления с суммарными затратами на потери энергии за срок службы для замкнутой системы. Здесь также не учитывается, что сечение жилы должно выбираться по условию экономичности.

В данной работе рассматриваются три основные схемы заземления экранов, представленные на рис. 1: двустороннее заземление, одностороннее заземление и транспозиция экранов. Каждая из этих схем имеет свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при выборе оптимального решения.

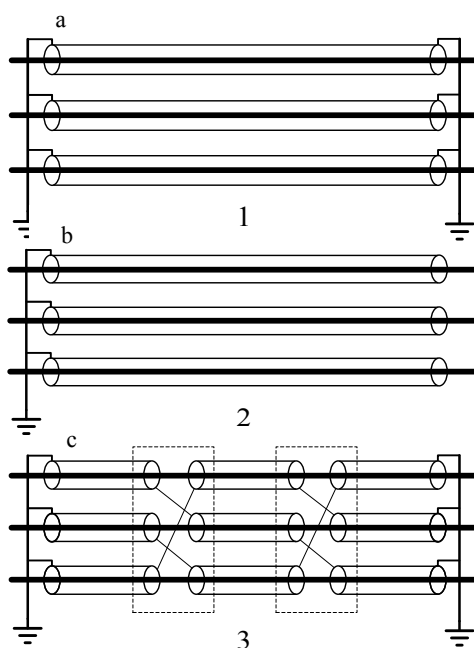


Рис. 1. Схемы заземления экранов: а – двустороннее; б – одностороннее; в – транспозиция

Fig. 1. Screen grounding schemes: a – two-sided; b – one-sided; c – transposition

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что существующие подходы к выбору схемы заземления экранов силовых ка-

бельных линий часто основываются на отдельных технических или экономических критериях без их комплексного учета. Отсутствует единая методология, позволяющая оптимизировать конфигурацию кабельной линии по критерию минимума приведенных затрат с учетом всех технических ограничений. Данная работа направлена на устранение этого пробела.

Целью работы является разработка методики выбора оптимальной схемы заземления экранов силовых кабельных линий по критерию минимума приведенных затрат с учетом технических ограничений по наведенному напряжению и пропускной способности линии.

Наведенные токи в экранах

При двустороннем заземлении экранов в них возникают циркулирующие токи, которые приводят к дополнительным потерям энергии и снижению пропускной способности кабельной линии. Эти токи индуцируются в экранах под воздействием переменного магнитного поля, создаваемого током в жиле кабеля.

Характер и величина циркулирующих токов зависят от способа прокладки кабелей. При прокладке одножильных кабелей в плоскости с двусторонним заземлением экранов возникают токи, превышающие токи при прокладке треугольником [8]. Возникающие токи при двустороннем заземлении уменьшают длительно допустимую токовую нагрузку кабеля, поскольку дополнительно разогревают кабель. В данной работе рассматривается только прокладка треугольником, поскольку она имеет меньшие приведенные затраты [9].

Потери в экране трех одножильных кабелей, расположенных треугольником, экраны которых заземлены с двух сторон [10], составят

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2},$$

где R_s – сопротивление экрана Ом/м; X – реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля, Ом/м, вычисляемое по формуле [10]:

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2s}{d_s}\right),$$

где $\omega = 2\pi f$, 1/с; s – расстояние между осями жил в данной электрической секции, мм; d_s – средний диаметр экрана, мм.

Наведенное напряжение на экране

При одностороннем заземлении экранов на незаземленном конце возникает наведенное напряжение, которое может представлять опасность для персонала и оборудования. Напряжение, наведенное на незаземленном конце секции экрана при одностороннем заземлении или секции транспо-

зиции в симметричном режиме при прокладке кабелей треугольником, определяем по выражению [11]

$$U_3 = I l X, \text{ В/м}, \quad (1)$$

где I – ток, протекающий по линии (длительно допустимый ток, либо ток короткого замыкания), А; l – длина линии, м;

Для одножильных кабелей напряжением 10 кВ, проложенных треугольником, с сечением жил 50–1000 и экранов 16–240, U_3 оказалось в пределах 10–43 В/км (большие значения характерны для больших сечений). При токе короткого замыкания 20 кА наведенное напряжение для этих кабелей составило около 950,1060 В/км.

Для одножильных кабелей напряжением 110 кВ, проложенных треугольником, с сечением жил 150–1200 и экранов 70–300, U_3 оказалось в пределах 15–44 В/км. При токе короткого замыкания 30 кА наведенное напряжение для этих кабелей равно 1394–1425 В/км.

Наведенное напряжение на экране должно удовлетворять условию электробезопасности

$$U_3 \leq U_{\text{доп}},$$

где $U_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение на разомкнутом конце экрана кабеля.

В различных источниках это значение варьируется от 25 В [12] до 100 В [13], а в некоторых странах допускаются значения до 400 В [4].

На основании этого ограничения можно определить предельную длину кабельной линии с односторонним заземлением экранов. В табл. 1 представлены расчетные значения предельной длины кабельной линии напряжением 110 кВ при прокладке треугольником по условию наведенного напряжения на экране при ограничении 25 В.

Данные табл. 1 показывают, что с увеличением сечения жилы критическая длина линии с односторонним заземлением экранов уменьшается. Это по большей части связано с увеличением тока в жиле и соответственно наведенного напряжения на экране.

Пропускная способность силовой кабельной линии

Для оценки длительно допустимых токов использовалась методика, представленная в стандартах [10, 14], для небронированного одножильного кабеля длительно допустимый ток составляет

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

где $\Delta\theta$ – превышение температуры жилы кабеля над средней температурой окружающей среды, °С; W_d – диэлектрические потери в изоляции, Вт/м; R – сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины кабеля при максимальной рабочей температуре, Ом/м; λ_1 – отношение потерь мощности в экране к общим потерям в жилах кабеля;

T_1, T_3, T_4 – тепловое сопротивление изоляции, оболочки, окружающей среды, К·м/Вт;

Результаты расчетов длительно допустимых токов нагрузки одножильных кабелей напряжением 110 кВ, проложенных треугольником в земле, для различных схем заземления экранов представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Предельная длина кабельной линии напряжением 110 кВ
при прокладке треугольником по условию наведенного напряжения
на экране при ограничении 25 В, км**

**Maximum length of a 110 kV cable line when laid in a triangle under the condition
of induced voltage on the screen with a limit of 25 V, km**

Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	150	185	240	300	400	500	630	800	1000	1200
Критическая длина линии, км	1,50	1,34	1,18	1,05	0,90	0,81	0,72	0,64	0,58	0,50

Таблица 2

**Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 110 кВ,
проложенных треугольником в земле**

**Long-term permissible load currents of single-core cables with a voltage of 110 kV
laid in a triangle in the ground**

Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	Площадь поперечного сечения экрана, мм ²													
	Двустороннее заземление							Одностороннее или транспозиция						
	70	95	120	150	185	240	300	70	95	120	150	185	240	300
150	305	305	304					309	309	309				
185	341	340	339	337				346	346	347	347			
240	391	389	387	385	383			398	399	399	399	400		
300	439	436	433	430	428	425		449	449	450	450	451	451	
400	506	502	497	493	489	484	481	522	523	523	523	524	525	526
500	566	559	553	547	542	535	531	588	588	589	589	590	591	592
630	633	624	616	607	600	591	585	664	665	665	665	666	667	669
800	708	696	685	673	663	651	643	752	752	752	753	754	755	756
1000	782	766	751	736	723	707	697	841	841	842	842	844	845	846
1200	872	849	830	810	792	772	758	954	955	955	955	957	958	960

Анализ данных табл. 2 показывает, что переход от двустороннего заземления к одностороннему или транспозиции приводит к увеличению пропускной способности кабельной линии на 1–26 % в зависимости от сечения жилы и экрана кабеля. Наибольший эффект наблюдается для кабелей с большим сечением жилы и экрана, что объясняется более значительными потерями в экранах при двустороннем заземлении для таких кабелей.

Важно отметить, что в условиях эксплуатации сечение жил должно удовлетворять требованиям предельного длительно допустимого нагрева в нормальном и послеаварийном режимах. Это техническое ограничение необходимо учитывать при выборе схемы заземления экранов.

Приведенные затраты для силовой кабельной линии

Для технико-экономической оптимизации схемы заземления экранов силовых кабельных линий в качестве критерия целесообразно использовать минимум приведенных затрат. Приведенные затраты представляют собой сумму эксплуатационных издержек и капитальных вложений, приведенных к одному году эксплуатации [15]:

$$З = (E + p_a)K + И, \quad (2)$$

где E – нижняя граница эффективности капиталовложений, принимаемая не ниже ставки за предоставление кредита или за хранение средств в банке; p_a – коэффициент отчислений на амортизацию; K – стоимость кабельной линии, руб.; $И$ – ежегодные издержки, руб.

Капитальные затраты на сооружение кабельной линии при двустороннем заземлении могут быть представлены

$$K_d = C_k + C_n,$$

где C_k – стоимость кабеля и муфт, руб.; C_n – то же прокладки кабельной линии, руб.

Для схемы с односторонним заземлением экранов

$$K_o = C_k + C_n + C_o,$$

где C_o – стоимость сооружения одностороннего заземления, руб.

Для схемы с транспозицией экранов капитальные затраты составят

$$K_t = C_k + C_n + C_t,$$

где C_t – стоимость сооружения полного цикла транспозиции, руб.

Эксплуатационные издержки для каждой схемы заземления определяются стоимостью потерянной электроэнергии в жилах и экранах кабелей

$$И = 3I_p^2 R \tau \beta \cdot 10^{-3},$$

где I_p – расчетный ток линии, А; R – эквивалентное электрическое сопротивление кабеля (с учетом поверхностного эффекта, эффекта близости и потерь в экране) [16], Ом; τ – эквивалентное время максимальных потерь; β – тариф на электроэнергию в электрической сети, руб./(кВт·ч).

Результаты и обсуждение

Определение наилучшего по приведенным затратам технического решения зависит от большого количества параметров, включая длину линии, сечение жилы и экрана, способ прокладки, тариф на электроэнергию и дру-

гие. Это не позволяет использовать упрощенные методы, такие как экономическая плотность тока или экономические интервалы, для выбора площади поперечного сечения жилы и схемы заземления экранов кабелей.

Таким образом, выбор оптимальной схемы заземления экранов требует перебора всех возможных вариантов с учетом технических ограничений и экономических показателей. Перебор может быть реализован в компьютерном программном обеспечении.

На примере кабельной линии напряжением 110 кВ (рис. 2) построена номограмма областей применимости схем заземления экранов в координатах «расчетный ток – длина», которые обеспечивают минимум приведенных затрат.

Использование той или иной схемы заземления экранов определяется комплексом факторов, включающих как технические ограничения (наведенное напряжение, пропускную способность, электробезопасность), так и экономические показатели (капитальные затраты, потери энергии, издержки на обслуживание).

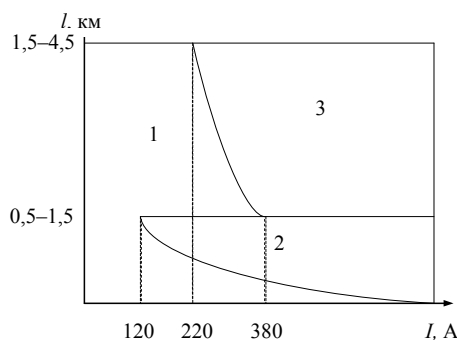


Рис. 2. Область применимости схем заземления экранов по критерию минимума приведенных затрат:
1 – двустороннее заземление;
2 – одностороннее заземление;
3 – один цикл транспозиции

Fig. 2. Scope of applicability of screen grounding schemes according to the criterion of minimum reduced costs:
1 – two-sided grounding;
2 – one-sided grounding;
3 – one cycle of transposition

Двустороннее заземление экранов целесообразно для линий с относительно невысокой токовой нагрузкой. Ориентировочные расчеты показывают: граница перехода к транспозиции находится в диапазоне токов нагрузки 220–380 А, переход к одностороннему становится экономически оправданным при токе приблизительно 120 А (при $\tau = 2000$ ч).

Для применения одностороннего заземления экранов на линиях большей протяженности требуется рассмотреть использование нескольких последовательных секций одностороннего заземления. Фактически три последовательные секции с односторонним заземлением эквивалентны в снижении наведенных напряжений одному полному циклу транспозиции и позволяют увеличить общую протяженность линии до 1,5–4,5 км. Учитывая, что сооружение трех таких секций экономически более выгодно, чем сооружение цикла транспозиции (за счет меньшей стоимости), данный вариант может быть предпочтительнее. Если бы такая схема была отображена на номограмме, она бы заняла всю область, соответствующую транспозиции, а область двустороннего заземления уменьшилась бы.

Предложенная методика развивает подходы, описанные в работах [5–7], дополняя их тем, что задача выбора схемы заземления экранов решается в рамках метода приведенных затрат.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика технико-экономического выбора схемы заземления экранов силовых кабельных линий, позволяющая определить оптимальный вариант с учетом минимума приведенных затрат и технических ограничений. Данный подход учитывает влияние схемы заземления на наведенное напряжение, циркулирующие токи в экранах и пропускную способность кабельных линий.

2. Одностороннее заземление, включая многосекционное исполнение, представляется экономически предпочтительным решением по отношению к транспозиции экранов. Двустороннее заземление оптимально для линий с относительно невысокой токовой нагрузкой и длиной, где издержки на потери электроэнергии не превышают затраты на дополнительные капиталовложения, связанные с транспозицией экранов или односторонним заземлением.

3. Выбор схемы заземления экранов существенно влияет на пропускную способность кабельной линии: при переходе от двустороннего заземления к одностороннему или транспозиции пропускная способность увеличивается на 1–26 % в зависимости от сечения жилы и экрана кабеля.

4. Практическое применение разработанной методики при проектировании силовых кабельных линий позволит повысить их экономическую эффективность и техническую надежность за счет оптимального выбора схемы заземления экранов с учетом конкретных условий прокладки и эксплуатации.

5. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка программного обеспечения для автоматизации процесса выбора оптимальной схемы заземления экранов с учетом всех технических и экономических факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Czapp, S. Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables—Case Study / S. Czapp, K. Dobrzynski // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No 19. Art. 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
2. Способы заземления экранов кабелей / А. А. Антонов, Ю. П. Гусев, Ю. Гусев [и др.] // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2016. № 5 (38). С. 86–91.
3. Zhao, T. Sheath Bonding Equipment for AC Transmission Cable Systems / T. Zhao // *Accessories for HV and EHV Extruded Cables*. Vol. 2: Land and Submarine AC/DC Applications. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 487–571. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80406-0_8.
4. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV: IEEE Std 575-2014. IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6905681>.

5. Дмитриев, М. Выбор и реализация схем заземления экранов однофазных кабелей 6–500 кВ / М. Дмитриев // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2013. № 6 (21). С. 90–97.
 6. Буре, И. Г. Влияние системы заземления экранов на выбор сечения кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена / И. Г. Буре, И. М. Хевсуриани, А. В. Быстров // *Электротехника*. 2016. № 11. С. 72–78.
 7. Быстров, А. В. Выбор системы заземления экранов при расчете сечения кабелей 6–500 кВ / А. В. Быстров, И. М. Хевсуриани // *Промышленная энергетика*. 2014. № 7. С. 19–23.
 8. 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 and Computer Engineering (IJECE)*. 2011. Vol. 2, No 1. <https://doi.org/10.11591/ijece.v2i1.115>.
 9. 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>.
 10. 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>.
 11. Бронгулеева, М. Н. Кабельные линии высокого напряжения / М. Н. Бронгулеева, С. С. Городецкий. Л.–М.: Госэнергоиздат, 1963. 512 с.
 12. Подгайский, С. И. Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: диссертация ... 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. IEC 60287-2-1:2023. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-affb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
 15. Герасименко, А. А. Электрические системы и сети: учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов-на-Дону: Феникс, 2023. 473 с.
 16. 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. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/22c648b0-31da-4b8b-a73c-90355e4d7914/iec-60287-3-2-2012>.
- Поступила 10.01.2025 Подписана в печать 18.03.2025 Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Czapp S., Dobrzynski K. (2020) Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables–Case Study. *Applied Sciences*, 10 (19), 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>.
2. Antonov A., Gusev O., Gusev Yu. Monakov Yu., Oknin E., Cho G. Ch. (2016) Methods of Grounding Cable Screens. *Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*, (5), 86–91 (in Russian).
3. Zhao T. (2023) Sheath Bonding Equipment for AC Transmission Cable Systems. *Accessories for HV and EHV Extruded Cables. Vol. 2: Land and Submarine AC/DC Applications*. Cham: Springer International Publishing, 487–571. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80406-0_8.
4. IEEE Std 575-2014. *IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6905681>.
5. Dmitriev M. (2013) Selection and Implementation of Grounding Schemes for Shields of Single-Phase Cables 6-500 kV. *Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*, (6), 90–97 (in Russian).

6. Bure I. G., Khevsuriani I. M., Bystrov A. V. (2016) Influence of the Shield Grounding System on the Selection of the Cross-Section of a Cable Line with Cross-Linked Polyethylene Insulation. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], (11), 72–78.
7. Bystrov A. V., Khevsuriani I. M. (2014) Selection of a Shield Grounding System When Calculating the Cross-Section of 6-500 kV Cables. *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (7), 19–23 (in Russian).
8. 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>.
9. 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).
10. 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>.
11. Bronguleeva M. N., Gorodetsky S. S. (1963) *High Voltage Cable Lines*. Leningrad–Moscow, Gosenergoizdat Publ. 512 (in Russian).
12. Podgaytsky S. I. (2022) *Power Electric Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation* [Dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University. 154 (in Russian).
13. Dmitriev M. V. (2021) *High Voltage Cable Lines*. Saint Petersburg, Polytekhn-Press Publ. 688 (in Russian).
14. 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>.
15. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2023) *Electrical Systems and Networks*. Rostov-on-Don, Fenix Publ. 473 (in Russian).
16. 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>.