



Методика выбора оптимальных марки и сечения провода на основе интегрированного технико-экономического критерия

Н.В. Савина¹, А.О. Варыгина²✉

^{1,2}Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия

Резюме. Цель – разработка новой методики совокупного выбора оптимальных марки и сечения провода воздушных линий электропередачи напряжением выше 1 кВ в условиях интенсивного развития электросетевого комплекса. Работа основана на двух авторских методах: методе выбора оптимальной марки провода, разработанного на базе метода анализа иерархий, и методе выбора оптимального сечения провода путем оптимизации удельных дисконтированных затрат на протяжении всего периода строительства и эксплуатации воздушной линии электропередачи. Отличительными особенностями предложенной авторами новой методики являются интеграция методов выбора оптимальных марки и сечения в единую методику и реализация проверок провода до проведения технико-экономических расчетов, так как они уже учтены при выборе марки провода и внутри метода выбора сечения. Апробация предложенной методики проведена на характерном примере реконструкции воздушной линии 110 кВ Западная – Давыдовка, которая создает ограничения в электроснабжении Приморского края из-за недостаточной пропускной способности провода и эксплуатации его свыше нормативного срока. В качестве решения для рассматриваемого примера выбран провод СЕНИЛЕК АТЗ/С 150/24. Его применение позволяет не только увеличить пропускную способность воздушной линии на 151% без замены существующих опор, но и снизить потери активной мощности в электрической сети на 18,9%, а реактивной мощности – на 2,5%. Предложенная методика обеспечивает выбор оптимальных марки и сечения провода любой конструкции с учетом динамично меняющихся условий функционирования электросетевого комплекса. Найденные по новой методике решения при дальнейшей эксплуатации линий позволяют получать оптимальные условия их функционирования и дополнительные эффекты: существенное повышение пропускной способности линии электропередачи, снижение количества используемых опор или реализацию замены провода линии без замены опор, уменьшение гололедообразования на проводах, снижение потерь электроэнергии.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, марка провода, провод нового поколения, сечение провода, критерий, конструкция, проектирование

Для цитирования: Савина Н.В., Варыгина А.О. Методика выбора оптимальных марки и сечения провода на основе интегрированного технико-экономического критерия // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 462–474. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-462-474>. EDN: HKKXBE.

POWER ENGINEERING

Original article

Methodology for selecting optimal wire grade and cross-section based on an integrated technical and economic criterion

Natalia V. Savina¹, Aleksandra O. Varygina²✉

^{1,2}Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

Abstract. The aim was to develop a methodology for selecting an optimal wire grade and cross-section for overhead power lines with a voltage of above 1 kV under intensive development of power grid systems. This aim was solved using the authors' previously developed methods: selection of an optimal wire grade based on hierarchy analysis and selection of an optimal wire cross-section by optimizing the specific discounted costs during the entire period of construction and operation of overhead power lines. In the present study, these methods are integrated into a single methodology. It is proposed to implement wire inspections prior to the stage of technical and economic calculations, since the necessary data has already been taken into account during the selection of a wire grade and its cross-section. The proposed methodology was tested on a typical example of reconstruction of the Zapadnaya–Davydovka 110 kV overhead line, which creates limitations in the power supply of Primorsky Krai due to insufficient wire capacity and its operation beyond the normative period. SENILEK AT3/C 150/24 wire was selected as a solution

for the example under consideration. The application of this wire grade allows not only the overhead line capacity to be increased by 151% without replacing the existing supports, but also active and reactive power losses in the electric network to be reduced by 18.9 and 2.5%, respectively. The proposed methodology enables selection of an optimal grade and cross-section of any wire design, taking the dynamically changing operational conditions of power grid systems into account. The solutions found by the proposed methodology may contribute to a more efficient operation of power lines due to increasing their transmission capacity, reducing the number of used supports, replacing the line wire without replacing supports, decreasing ice formation on wires, and reducing power losses.

Keywords: overhead power line, wire brand, new generation wire, wire cross-section area, criterion, construction, design

For citation: Savina N.V., Varygina A.O. Methodology for selecting optimal wire grade and cross-section based on an integrated technical and economic criterion. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):462-474. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-462-474>. EDN: HKKXBE.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование электросетевых объектов осуществляется в условиях внедрения технологий индустрии 4.0 в электросетевой комплекс [1] существенного и стабильного роста потребления электроэнергии во всем мире, внимания к повышению эффективности его функционирования [2], а также технических и экономических требований к принимаемым решениям [3, 4]. Все это способствует появлению на рынке электротехнического оборудования большого разнообразия новых технических решений для сооружения воздушных линий (ВЛ). Конструктивное исполнение ВЛ подвергается существенным изменениям, по сравнению с традиционным, практически по всем элементам [5–7]: опорам, проводам, средствам грозозащиты, изолирующей подвеске.

Среди проводниковой продукции выделилось большое количество новых марок проводов, которые за счет изменения конструкции провода и используемых материалов позволяют не только улучшить характеристики провода (например, повышение пропускной способности, улучшение механической прочности), но и получить дополнительные положительные эффекты от их применения (например, снижение гололедообразования на проводах) и существенные экономические выгоды [8, 9]. Такие провода обобщенно стали называть проводами нового поколения (ПНП) [10]. В зарубежной литературе для обозначения данного вида проводов встречаются следующие термины: «energy-saving conductors» (энергосберегающие провода) [11], «high temperature conductors» (высокотемпературные провода) [12] или «High Temperature Low Sag conductors – HTLS conductors» (высокотемпературные провода с малым провисанием) [13], «advanced

conductors» (улучшенные провода) [14, 15]. Следовательно, параметры линий электропередачи (ЛЭП) претерпевают существенные изменения, которые должны быть учтены при проектировании.

Учитывая, что проекты реконструкции, модернизации, технического перевооружения и нового строительства в электросетевом комплексе реализуются в рамках инвестиционных программ электросетевых компаний, то решение задачи выбора оптимальных марки и сечения провода должно рассматриваться в контексте инвестиционного планирования. Как следствие, сложность и требования к проектированию ЛЭП многократно возрастают.

Поскольку сечение провода определяет основные технико-экономические характеристики ВЛ, то поиску его оптимального значения отводится ключевая роль. Актуальность этой задачи становится острее с появлением новых марок проводов, расширением линейки возможных значений сечений и развитием рыночных отношений в электроэнергетике. Примерами новых марок проводов могут служить высокотемпературный провод из алюминиевого сплава Al-Zr со стальным сердечником марки АСТ, провод повышенной нагрузочной способности марок СЕНИЛЕК АТЗ/С и АТЗП/С, высокопрочный провод АСВП.

В то же время неоднократно в технической литературе упоминается, что существующие традиционные методы выбора сечения провода (метод экономической плотности тока, метод экономических токовых интервалов) имеют множество недостатков [16, 17] и не учитывают современные условия функционирования электроэнергетических систем, а к выбору сечений проводов нового поколения и вовсе не применимы. К тому же в настоящее время не существу-

ет методик совокупного выбора оптимальных марки и сечения провода ВЛ, что подтверждает необходимость ее разработки и актуальность темы исследования.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка новой методики совокупного выбора марки и сечения провода воздушных линий электропередачи напряжением выше 1 кВ, обеспечивающей оптимальные условия эксплуатации ВЛ при выполнении всех поставленных требований на фоне интенсивного развития электросетевого комплекса и подтверждение корректности и целесообразности ее применения на конкретном примере.

МЕТОДИКА СОВОКУПНОГО ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРКИ И СЕЧЕНИЯ ПРОВОДА

Выбор оптимальных марки и сечения провода является сложной многокритериальной задачей при большом количестве возможных альтернативных вариантов решения. Они формируются не только традиционными марками и сечениями проводов воздушных линий электропередачи, но и новыми марками проводов, различными вариантами их исполнения, и их (в некоторых случаях) измененными рядами сечений. Характеристики и стоимость проводов могут варьироваться не только в зависимости от их конструктивных особенностей, но и от условий технико-коммерческих предложений поставщиков проводниковой продукции. Данные обстоятельства свидетельствуют о том, что выбор марки и сечения провода должен быть в единой методике, при этом необходимо сначала выбрать оптимальную марку провода, а затем – оптимальное сечение. Такой подход сократит трудозатраты поиска решения при большой области его поиска и снимет противоречия, возникающие при их раздельном выборе, как это происходит в настоящее время. При этом выбор оптимальной марки провода должен быть основан на системном и многокритериальном анализе выбора альтернатив, а выбор оптимального сечения – на основе интегрированного технико-экономического критерия.

Новая методика выбора провода в современных условиях функционирования электросетевого комплекса должна:

1) интегрировать в себе выбор марки и сечения провода, который позволит сфор-

мировать ограниченную область возможных решений;

2) быть применима к проводам любой существующей конструкции;

3) соответствовать всем возможным видам проектов, реализуемым в электросетевом комплексе и связанным с проектированием ВЛ напряжением выше 1 кВ;

4) базироваться на современном технико-экономическом критерии, позволяющем учитывать особенности проекта (условия трассы, конструктивные особенности ВЛ) и экономические условия его реализации;

5) обеспечивать легко интерпретируемый результат, который позволяет получать оптимальные условия эксплуатации проектируемого объекта при выполнении всех поставленных требований.

В предложенной методике выбора провода предлагается интеграция выбора оптимальных марки и сечения в единый алгоритм. В ней выбор оптимальной марки провода построен на наиболее востребованном в инвестиционно-строительной деятельности методе анализа иерархий. Этот метод является авторским, а суть его реализации заключается в попарном сравнении альтернативных вариантов множества марок проводов I для каждого отдельного из определенных по целям проекта множества критериев K с использованием шкалы сравнительной важности при наборе внешних условий, представляемых множеством J . По результатам оценок составляются K прямоугольных матриц, где элемент матрицы, стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца, представляет собой численную оценку i -й альтернативы марки провода по критерию k при реализации набора внешних условий с номером j .

Для выбора марки провода вводится многокритериальная функция полезности, под которой понимается числовая функция, определенная на множестве возможных альтернативных вариантов и имеющая следующий вид:

$$u_{ij} = f(u^1(x_{ij}^1), u^2(x_{ij}^2), \dots, u^k(x_{ij}^k), \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k), \quad (1)$$

где $u^k(x_{ij}^k)$ – одномерные функции для каждого критерия, аналитическое представление которых пока неизвестно, где $k = \overline{1, K}$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$; λ_k – весовые коэффициенты.

Та марка провода, численная оценка полезности которой будет больше, и будет являться предпочтительной, а, следовательно, оптимальной.

Тогда критерий оптимальности для выбора марки провода представляется в виде

$$u_{ij} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Данный авторский метод в полном объеме используется в единой методике выбора оптимального провода. Подробно он представлен в [18], а порядок его реализации приведен на рис. 1.

Затем для выбранной оптимальной марки провода выбирается его сечение. В общем случае технико-экономическое обоснование (ТЭО) служит основанием для выявления его инвестиционной эффективности. Выбор сечения проводов традиционной конструкции по³ основывается на минимуме приведенных затрат. Данный критерий не учитывает изменения, произошедшие в электросете-

вом комплексе, и не отвечает современным требованиям ТЭО проектов в отрасли. К тому же в настоящее время перечень критериев для ТЭО расширился. В [19] на основе системного подхода к построению технико-экономической модели провода и анализа существующих методов ТЭО проектных решений авторами разработана технико-экономическая модель сечения провода, учитывающая тепловую модель провода [20] и случайный характер изменения тока ВЛ. Эта модель позволяет выбирать оптимальные сечения проводов различной конструкции и марок. Принципиальным отличием предложенного методического подхода является совместный учет физических основ протекания тока по проводу, конструкции провода, свойств окружающей среды и экономических параметров. Такой подход позволяет получить интегрированный технико-экономический критерий выбора провода в виде удельных дисконтированных затрат (УДЗ), определяемых на единицу длины провода:

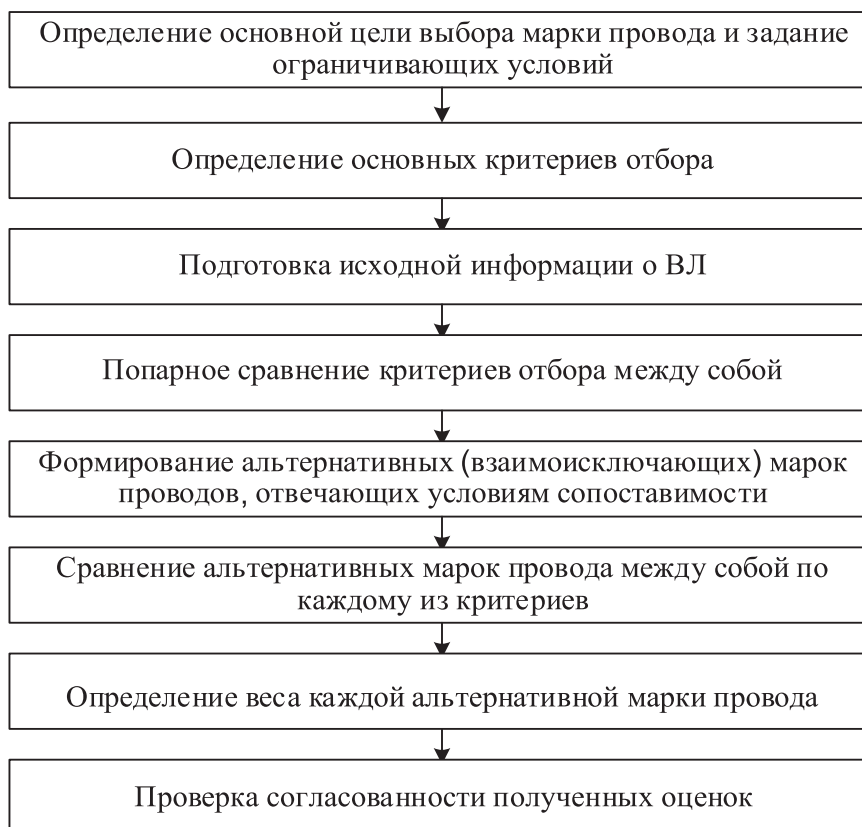


Рис. 1. Порядок реализации метода выбора оптимальной марки провода

Fig. 1. Implementation procedure for the optimal wire brand selection method

³Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2008. 704 с. Режим доступа: https://mwtct.ru/images/stories/download/certificate/PUE_7.pdf. (дата обращения: 03.04.2024).

$$Z_{\text{диск}} = \sum_{t=0}^T [K_t(1 + \alpha_{\text{ам}} + \alpha_{\text{рзо}}) + C_{\Delta W}(3 \cdot I(t)^2 \cdot R \cdot T_p \cdot 10^3 + 8760 \cdot \Delta P_{\text{кор}} + \frac{U_n^2 \cdot T_{\text{вл.п.}} \cdot N_{\text{зир}}}{3 \cdot N_{\text{из}} \cdot R_{\text{из}} \cdot 10^3})] \cdot (1 + r)^{-t}, \quad (3)$$

где T – период эксплуатации и строительства ВЛ, количество лет; t – конкретный год рассматриваемого периода; K_t – капитальные вложения, руб.; $\alpha_{\text{ам}}$ – коэффициент амортизационных отчислений; $\alpha_{\text{рзо}}$ – коэффициент (норма) отчислений на ремонт, эксплуатацию и обслуживание ЛЭП; $C_{\Delta W}$ – удельная стоимость потерь электроэнергии, руб/кВт·ч; $I(t)$ – значение тока, протекающего по линии, А; R – сопротивление единицы длины линии, Ом; T_p – число рабочих часов ЛЭП за год, ч; $\Delta P_{\text{кор}}$ – удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ, кВт; U_n – номинальное напряжение линии, кВ; $T_{\text{вл.п.}}$ – среднее число часов влажной погоды в году, ч; $N_{\text{зир}}$ – число гирлянд на единицу длины ВЛ, шт.; $N_{\text{из}}$ – число изоляторов в гирлянде, шт.; $R_{\text{из}}$ – сопротивление одного подвесного изолятора в гирлянде, Ом; r – ставка дисконтирования.

Взяв за основу интегрированный технико-экономический критерий по формуле (3), алгоритм метода выбора оптимального сечения можно представить следующими этапами:

1) определение ряда сечений оптимальной марки провода для дальнейшей оптимизации на основе целей выбора и традиционных проверок сечения провода по выполнению условий механической прочности, длительно допустимого нагрева, ограничения воздействия коронного разряда и радиопомех от короны, что приводит к снятию противоречий, возникающих при выборе марки и дальнейшем выборе сечения при их отдельном рассмотрении;

2) подготовка исходных данных для оптимизации сечения;

3) построение зависимостей УДЗ от тока, протекающего по линии, для сформированного ряда сечений провода по формуле (1);

4) выбор оптимального сечения провода выбранной марки по минимуму УДЗ:

$$Z_{\text{диск}} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Таким образом, отличительной особенностью метода выбора оптимального сечения является реализация проверок провода до технико-экономических расчетов, что позволяет получить ограниченный ряд сечений для дальнейших расчетов. Это обеспечивает не только упрощение расчета, но и исключение потенциального противоречия результатов метода выбора сечения и их проверок. К выбору сечения допускаются только те альтернативные варианты, которые потенциально соответствуют всем установленным требованиям.

Интеграция разработанных методов выбора оптимальной марки провода и оптимального сечения провода в единую методику выбора провода позволила впервые осуществить объективный сравнительный анализ ВЛ различных конструктивных исполнений по исходной информации, актуальной на рассматриваемый период времени и для конкретного района размещения ВЛ.

Область применения новой методики не ограничивается только ВЛ напряжением выше 1 кВ, она может быть применена к воздушной части кабельно-воздушных ЛЭП, которые стали получать широкое распространение как реализация востребованной технологии электропередачи для ТЭК РФ⁴.

ВЫПОЛНЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реализация и подтверждение целесообразности и корректности применения авторской методики осуществлены на реальном проекте реконструкции одноцепной ВЛ 110 кВ Западная – Давыдовка, которая является изношенной и создает ограничения в электроснабжении Приморского края. Данный пример является характерным, так как направлен на повышение пропускной способности ВЛ.

ВЛ 110 кВ Западная – Давыдовка введена в эксплуатацию в 1968 г. Ее протяженность составляет 20,48 км, из которых 4,74 км выполнены проводом АС-120/19, а 15,74 км выполнены проводом М-70. Кли-

⁴Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р (ред. от 28.02.2024). Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (дата обращения: 05.03.2024).

матогеографическая характеристика региона расположения ВЛ: умеренно муссонный климат с максимальной и минимальной температурами $+35^{\circ}\text{C}$ и -44°C , соответственно, средняя температура самого теплого месяца (августа) $+21^{\circ}\text{C}$ и средняя скорость ветра в августе составит 4 м/с.

Цель проекта: замена физически изношенных проводов, которые выработали нормативный срок службы, без замены опор на провод отечественной марки.

Задачи проекта: повышение пропускной способности и надежности ВЛ; снижение механических нагрузок.

Расчет токовой нагрузки ЛЭП, выполненный с помощью ПВК RastWin3, показал, что в режиме зимнего максимума нагрузки 2024 года ток, протекающий по линии, составляет 350 А, а в режиме летнего максимума – 261 А. Ток ВЛ в режиме зимнего максимума превышает длительно допустимый ток (ДДТ) участка ВЛ, выполненного проводом М-70, и равного 337 А. Максимальный ток ВЛ при наиболее тяжелом послеаварийном режиме в схеме района (ремонт ВЛ 110 кВ Западная – Кипарисово-Раздольное-1) составляет 488 А и также превышает ДДТ участка ВЛ, выполненного проводом М-70, что приводит к отключению потребителей. Среднегодовой темп прироста потребления электрической энергии в Приморском крае составляет 1,42%⁴. Прогноз токовой нагрузки для зимнего максимума составляет 376 А, для летнего – 281 А.

Предлагаются следующие отечественные марки провода к применению: АС, АСВТ, АСВП, АСку, АСТ, СЕНИЛЕК АТЗ/С, СЕНИЛЕК АТЗП/С. Варианты медных проводов не рас-

сматриваются, так как в приведенном примере медные провода с сечением больше 70 мм² не позволят реализовать проект без замены опор из-за своего веса по условиям механической прочности.

Предварительные сечения отобранных марок проводов принимаются по исходным данным о существующей ВЛ. В данном случае в качестве базовых провода и сечения принят АС 120/19, так как он используется в настоящее время, для остальных марок взяты соразмерные сечения. Если же имеются замечания по пропускной способности к применяемому в настоящее время сечению, то для выбора марки можно взять следующий размер сечения из ряда проводниковой продукции.

Уточнение значений длительно допустимых токов для отобранных проводов реализуется с использованием предложенной в [20] тепловой модели и учетом климатических особенностей региона. Тем самым обеспечивается выполнение условия длительно допустимого нагрева. Представим в табл. 1 результаты уточнения ДДТ с оценкой отклонений от справочных значений^{6,7}.

Как видно из табл. 1, значения ДДТ существенно изменились, в некоторых случаях даже свыше 5%. В большинстве случаев уточненное значение ДДТ возросло, что легко объясняется более низким значением принятой к расчету температуры (21°C) по сравнению со справочной (25°C), для которой приведены значения ДДТ. В ряде случаев при пересчете ДДТ оказывается ниже справочного значения в результате воздействия принятых к расчету температуры и скорости ветра.

Таблица 1. Уточнение значений длительно допустимых токов

Table 1. Revised values of long-term permissible currents

№	Марка провода	ДДТ справочный, А	ДДТ расчетный, А	Отклонение, %
1	АС 120/19	390	419	+ 7,4
2	АСВТ 128/36	665	689	+ 3,6
3	АСВП 128/36	408	461	+ 13,0
4	АСТ 120/19	862	733	- 15,0
5	СЕНИЛЕК АТЗ/С 120/19	724	764	+ 5,5
6	СЕНИЛЕК АТЗП/С 120/19	706	733	+ 3,8

⁴Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Приморского края на 2021–2025 гг. Режим доступа: <https://primorsky.ru/authorities/executive-agencies/ministries/energy/structure/sipr.php> (дата обращения: 01.03.2024).

⁶Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии: технический справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Эллипс, 2006. 360 с.

Таблица 2. Характеристики рассматриваемых проводов
Table 2. Characteristics of wires under investigation

№	Марка провода	ДДТ, А	Стоимость, тыс. руб/км	Масса, кг/км
1	АС 120/19	419	165,0	471
2	АСВТ 128/36	689	236,2	659,5
3	АСВП 128/36 1	461	231,0	659,5
4	АСТ 120/19	733	180,0	471
5	СЕНИЛЕК АТЗ/С 120/19	764	240,7	471
6	СЕНИЛЕК АТЗП/С 120/19	733	277,5	478

После уточнения значений ДДТ переходим непосредственно к *выбору марки провода*. Критерии отбора (далее критерии): первый – ДДТ; второй – стоимость провода. Критерием ограничения обозначена масса провода, по контрольному значению массы провода М-70 614,82 кг/км. В данном случае критерии приняты для демонстрации реализации метода и задания условия по механической прочности. Характеристика проводов по критериям отображена в табл. 2.

Провода марок АСВТ и АСВП исключены по причине превышения ограничения по массе провода.

Сравнение критериев представлено в табл. 3 с учетом большей важности выполнения условия по нагреву для провода над его стоимостью. Вес каждого критерия рассчитан как отношение среднего геометрического элемента соответствующей строки к сумме значений средних геометрических по столбцу. Промежуточные результаты выбора оптимальной марки провода, полученные по алгоритму, приведенному в [18], показаны в

табл. 4–5. В них отражено попарное сравнение марок провода между собой по каждому из критериев с определением веса каждой марки провода. При одинаковой характеристике по критерию присваивается значение «1», при средней степени превосходства – «3», при существенном превосходстве – «5», а при очень сильном превосходстве – «7», в противном же случае (характеристики одной марки провода в разной степени уступают другой) отражаются обратные соответствующие значения ($1/3 = 0,33$, $1/5 = 0,20$, $1/7 = 0,14$).

Проверка согласованности сравнения оценивается по максимальным собственным значениям матриц сравнения λ_{max} , индексу согласованности $C.I.$ и коэффициенту согласованности $C.R.$ по формулам:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}; \quad (5)$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}, \quad (6)$$

Таблица 3. Сравнение критериев

Table 3. Criteria comparison

Критерий	ДДТ	Стоимость	Среднее геометрическое	Вес критерия
ДДТ	1,00	3,00	1,73	$1,73 / 2,31 = 0,75$
Стоимость	0,33	1,00	0,58	$0,58 / 2,31 = 0,25$
Сумма	1,33	4,00	2,31	1,00

Таблица 4. Сравнение марок проводов по критерию 1

Table 4. Wire brand comparison according to criterion 1

По ДДТ	АС	АСТ	АТЗ/С	АТЗП/С	Среднее геометрическое	Вес
АС	1,00	0,20	0,14	0,20	0,27	0,05
АСТ	5,00	1,00	0,33	1,00	1,14	0,21
АТЗ/С	7,00	3,00	1,00	3,00	2,82	0,53
АТЗП/С	5,00	1,00	0,33	1,00	1,14	0,21
Сумма	18,00	5,20	1,81	5,20	5,36	1,00

Таблица 5. Сравнение марок проводов по критерию 2
Table 5. Wire type comparison according to criterion 2

По стоимости	АС	АСТ	АТЗ/С	АТЗП/С	Среднее геометрическое	Вес
АС	1,00	3,00	5,00	7,00	3,20	0,57
АСТ	0,33	1,00	3,00	4,00	1,41	0,25
АТЗ/С	0,20	0,33	1,00	3,00	0,67	0,12
АТЗП/С	0,14	0,25	0,33	1,00	0,33	0,06
Сумма	1,68	4,58	9,33	15,00	5,61	1,00

где n – порядок матрицы (матрицы формируются по данным таблиц).

Для подтверждения непротиворечивости результатов сравнения и проверки корректности оценок должно выполняться условие:

$$C.R. \leq 0,10. \quad (7)$$

Проверка согласованности полученных оценок показала, что парные сравнения не противоречивы, а оценка верна и убедительна, так как условие по формуле (7) выполняется:

- для табл. 4 $C.I. = 0,025$ при $n = 4$, $\lambda_{max} = 4,075$, $R.I. = 0,89$, $C.R. = 0,028 \leq 0,10$;
- для табл. 5 $C.I. = 0,035$ при $n = 4$, $\lambda_{max} = 4,104$, $R.I. = 0,89$, $C.R. = 0,039 \leq 0,10$.

При весах критериев первого (ДДТ) – 0,75, а второго (стоимости) – 0,25 получим результаты, выраженные в долях и процентах и приведенные в табл. 6.

Как видно из табл. 6, наибольшее соответствие поставленным целям проекта по установленным критериям показал провод

марки СЕНИЛЕК АТЗ/С со значением равным 42,4%. Таким образом, выбрана оптимальная марка провода для данного случая.

Для дальнейшего анализа для выбранной марки ПНП СЕНИЛЕК АТЗ/С берутся те сечения из ряда, которые по массе не превышают значения 614,82 кг/км и по ДДТ провода выдерживают требуемую прогнозную токовую нагрузку ЛЭП в режиме зимнего максимума (376 А) и наихудшего послеаварийного режима (488 А). Таких всего 4 варианта, которые показаны в табл. 7. Также для отобранных сечений выполняется условие ограничения отрицательного воздействия коронного разряда и радиопомех от короны. Если бы речь шла о проводе традиционной марки, то в случае, если на ВЛ 110 кВ уже используется провод АС 120/19, необходимо рассматривать сечения, начиная со 120 мм² с соблюдением технических ограничений. Но в рассматриваемом примере провода марки АС исключаются из рассмотрения, так как до сечения 185 мм² они не удовлетворяют условиям по значениям ДДТ, а после – введенному ограничению по массе для

Таблица 6. Результат выбора марки провода для рассматриваемого случая
Table 6. The result of wire brand selection for the case under consideration

Марка	АС	АСТ	СЕНИЛЕК АТЗ/С	СЕНИЛЕК АТЗП/С
Итоговый результат в долях	0,181	0,222	0,424	0,173
Итоговый результат в %	18,1	22,2	42,4	17,3

Таблица 7. Сформированный ряд сечений выбранной марки
Table 7. Formed series of wire sections of the selected type

№	СЕНИЛЕК АТЗ/С	ДДТ, А	Удельная масса провода (со смазкой), кг/км	Цена, приведенная к 2001 г. ¹ , тыс. руб. за 1 км	Стоимость провода для сооружения 1 км ВЛ, тыс. руб.
1	70/11	501	276	19,6	430,95
2	95/16	627	385	26,2	576,06
3	120/19	724	471	32,1	705,78
4	150/24	846	599	39,7	872,88

Таблица 8. Техничко-экономические параметры воздушных линий**Table 8.** Overhead line performance characteristics

Параметр	Значение
Срок службы линии	50 лет
Номинальное напряжение	110 кВ
Коэффициент амортизационных отчислений	0,02
Коэффициент (норма) отчислений на ремонт, эксплуатацию и обслуживание ЛЭП	0,008
Число рабочих часов в год	8760 ч
Удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ	0,14 кВт/км
Среднее число часов влажной погоды в году (на примере г. Владивосток)	1608 ч
Число изоляторов в гирлянде	7 шт
Соппротивление одного подвешного изолятора в гирлянде	300 МОм
Число гирлянд на 1 км ВЛ	27 шт/км
Одноставочный тариф	1,757руб/кВт·ч
Ставка дисконтирования	0,1

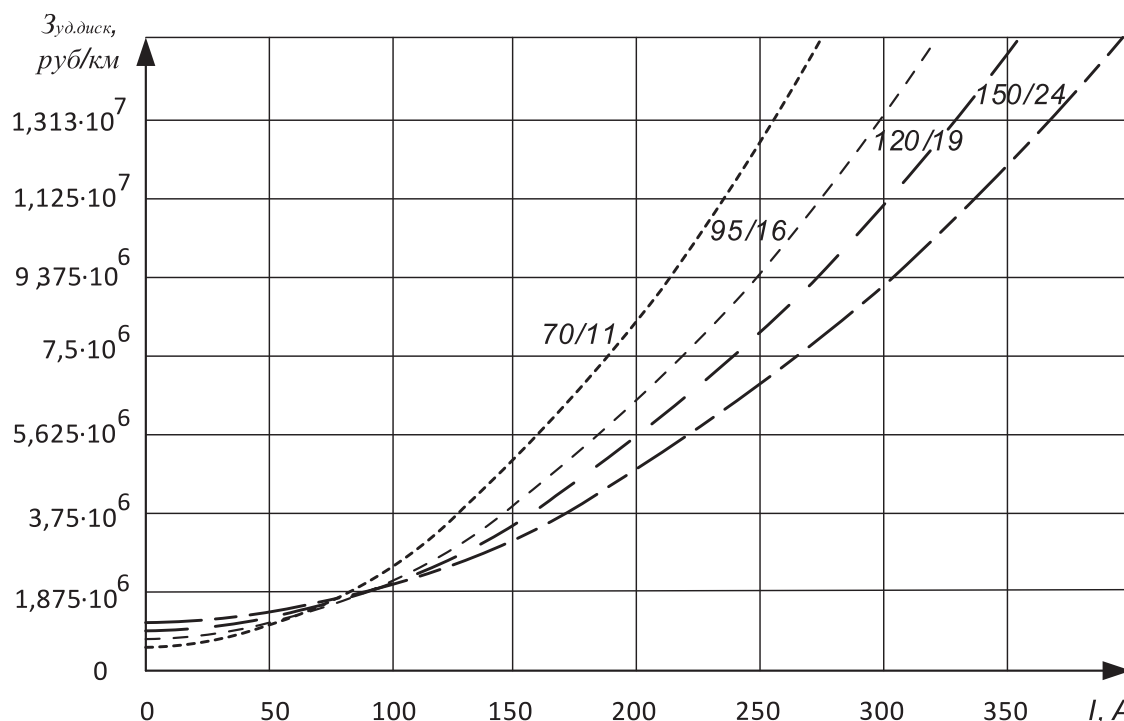
реализации рассматриваемого проекта без замены опор [21].

Перечень технико-экономических параметров ВЛ для расчета УДЗ представлен в табл. 8.

После формирования технико-экономических параметров ВЛ, выбранной марки провода и ее сечений переходим к непосредственному построению семейства зави-

симостей УДЗ от тока, протекающего по ВЛ в режиме зимнего максимума. На рис. 2 показано построение семейства зависимостей УДЗ от тока с учетом расчета всех составляющих издержек⁷.

В табл. 9 приведена интервальная оценка оптимальных токовых диапазонов для рассматриваемого случая.

**Рис. 2.** Построение семейства зависимостей удельных дисконтированных затрат от тока в линии**Fig. 2.** Construction of a family of dependences of specific discounted costs on overhead line current

⁷СТО 56947007-29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения. М.: ФСК ЕЭС, 2019. 98 с.

Таблица 9. Интервальная оценка оптимальных токовых диапазонов для рассматриваемого случая реконструкции ВЛ 110 кВ

Table 9. Interval assessment of optimal current ranges for the studied reconstruction case of the 110 kV overhead line

Сечение СЕНИЛЕК АТЗ/С	70/11	95/16	120/19	150/24
Токовый диапазон, А	до 58	59–80	81–97	свыше 97

На завершающем этапе *выбора оптимального сечения*, учитывая, что в режиме зимнего максимума нагрузка по ВЛ составляет 376 А, выбран провод СЕНИЛЕК АТЗ/С 150/24 для всей реконструируемой линии. Аналогичная проверка реализована для режима летнего максимума нагрузки ВЛ со значением 281 А. Результат не изменился. Оптимальные условия функционирования ВЛ обеспечены в течение всего года.

Дополнительные проверки провода после получения оптимального результата по новой методике не требуются, так как они уже учтены как при выборе марки провода, так и при формировании ряда возможных сечений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения целесообразности и корректности применения новой методики рассчитаны потери в электрической энергии в сети 110 кВ до замены провода и после, а также оценено увеличение пропускной способности ВЛ. В табл. 10 представлены результаты расчета потерь электрической энергии с помощью программно-вычислительного комплекса RastrWin 3.

Замена провода в данном случае позволит не только увеличить пропускную способность ВЛ на 151% без замены существующих опор, но и снизить потери активной мощности в рассматриваемой электрической сети на 18,9%, а реактивной мощности – на 2,5%. Таким образом, предлагаемая методика позволяет получать дополнительные эффекты для электросетевого комплекса. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения методики выбора оптимальных

марки и сечения провода в эксплуатационной и проектной практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика совокупного выбора оптимальных марки и сечения провода:

1) позволяет выбрать оптимальные марку и сечение провода любой конструкции для любых сценариев проектирования электросетевого объекта (реконструкция, модернизация, новое строительство, проектирование развития), снимая необходимость в ряде дополнительных проверок, присущих традиционным методам выбора сечений проводов;

2) обеспечивает учет всех требований и особенностей проекта и позволяет получать дополнительные положительные эффекты, такие как существенное повышение пропускной способности ВЛ, снижение количества используемых опор или реализация замены провода линии без замены опор, снижение потерь электроэнергии;

3) интегрирует реализацию проверок в саму методику выбора оптимального провода ВЛ, тем самым позволяя уйти от возможных противоречий при получении результатов при выборе марки и сечения провода.

Таким образом, в результате проведенного исследования предложена новая методика выбора провода ВЛ, принципиально отличающаяся от существующих совокупным выбором марки и сечения провода, реализацией проверок проводов до их технико-экономического сопоставления на основе интегрированного технико-экономического критерия и направленного на получение оптимальных технических и экономических эффектов.

Таблица 10. Сравнение величины потерь электрической энергии в электрической сети

Table 10. Comparison of the amount of electrical energy losses in the electrical network

Расчетный случай	До замены провода	После замены провода	Снижение потерь, %
Потери активной мощности, МВт	3,34	2,71	18,9
Потери реактивной мощности, Мвар	5,42	5,29	2,5

Список источников

1. Демьянова О.В., Бадриева Р.Р. Особенности реализации проектов индустрии 4 в электроэнергетике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2022. № 3. С. 161–175. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2022.3.12>. EDN: MOGVMV.
2. Zhu Yuan, Liu Yijiang, Zuo Anxin, Dong Jun, Xu Dan. A comparative study of investment efficiency of Chinese provincial power grid companies based on Super Efficiency SBM model // 5th International Conference on Power and Energy Technology (Tianjin, Jul 2023). Tianjin, 2023. P. 854–858. <https://doi.org/10.1109/ICPET59380.2023.10367562>.
3. Harbi F.Al., Csala D. Saudi Arabia's electricity: energy supply and demand future challenges // 1st Global Power, Energy and Communication Conference (Nevsehir, 12–15 June 2019). Nevsehir, 2019. P. 467–472. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778554>.
4. Wang Rizhao, Zhang Hengxu, Shi Fang, Zhang Yong, Zhang Lei. Empirical study of the relationship between global energy consumption and economic growth // China International Electrical and Energy Conference (Beijing, 1 October 2017). Beijing: IEEE, 2017. P. 394–399. <https://doi.org/10.1109/CIEEC.2017.8388480>.
5. Selvaraj M., Kulkarni S.M., Rameshbabu R. Performance analysis of a overhead power transmission line tower using polymer composite material // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 5. P. 1340–1348. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.451>.
6. Reddy B.S., Mitra G. Investigations on high temperature low sag (HTLS) conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. No. 4. P. 1716–1724. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2950992>.
7. Вариводов В.Н., Казаков С.Е., Кулик В.В., Ударов В.М. Стальные многогранные опоры для распределительных электрических сетей: возможности и перспективы // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2005. № 2. С. 37–42. EDN: KUHWOV.
8. Hadzimuratovic S., Fickert L. Impact of gradually replacing old transmission lines with advanced composite conductors // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. 2018. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2018.8571614>.
9. Zhen Liu, Jian Zhang, Jiao Zhu, Dongyang Lin, Shengchun Liu, Cheng Yao. Development of high stress and large capacity conductor for large crossing transmission lines // International Conference on Applied Physics and Computing (Ottawa, 2022). Ottawa: IEEE, 2022. P. 248–251. <https://doi.org/10.1109/ICAPC57304.2022.00053>.
10. Федоров Н.А. Провода нового поколения и вопросы надежности ЛЭП // Работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 19 октября 2016 г.). Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2016. С. 42–49. EDN: ХСКУКТ.
11. Bingran Shao, Jin Liu, Yingmin Feng, Guangsheng Cui, Bo Yan, Guoqi Ren. Analysis on selecting application of energy-saving conductors in overhead transmission line construction // China International Conference on Electricity Distribution. 2016. <https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7576160>.
12. Lauria D., Quaia S. An investigation on line loadability increase with high temperature conductors // 6th International Conference on Clean Electrical Power. 2017. P. 645–649. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004757>.
13. Hoffman J., Reil M., Waters D.H., Wong C.K.W., M. Kumosa S.M. Evaluation of strains in dead-end fittings of high-temperature low sag electrical conductors using FBG sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024. Vol. 73. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3352708>.
14. Beryozkina S. Potential application of the advanced conductors in a transmission line project // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. 2018. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493858>.
15. David T., Dave B. How advanced conductors are improving the T&D system and combating climate change // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2022. <https://doi.org/10.1109/TD43745.2022.9816899>.
16. Зуев Э.Н. К вопросу об актуализации нормативов на экономическую плотность тока // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2002. № 6. С. 39–45.
17. Song Yanrong, Zeng Hubiao. Optimization design of the conductor section selection in the transmission line // Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System. 2011. <https://doi.org/10.1109/PACCS.2011.5990283>.
18. Савина Н.В., Варыгина А.О. Выбор оптимальной марки провода высоковольтных воздушных линий электропередачи на основе критериального анализа // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 339–353. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>. EDN: PRKWCM.
19. Varygina A.O., Savina N.V. Technical and economic model of the conductor cross-section for active-adaptive electrical networks // Majlesi Journal of Electrical Engineering. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 27–34. <https://doi.org/10.52547/mjee.16.3.27>.
20. Варыгина А.О., Савина Н.В. Расчет длительно допустимого тока проводов нового поколения воздушных линий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 4. С. 3–15. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-3-15>. EDN: MSHLRM.
21. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети / пер. с англ.; науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. М.: ЛКИ, 2008. 360 с.

References

1. Demyanova O.V., Badriyeva R.R. Features of industry 4.0 projects in the energy sector. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Sociology and Economics*. 2022;3:161-175. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2022.3.12>. EDN: MOGVMV.
2. Zhu Yuan, Liu Yijiang, Zuo Anxin, Dong Jun, Xu Dan. A comparative study of investment efficiency of Chinese provincial power grid companies based on Super Efficiency SBM model. In: *5th International Conference on Power and Energy Technology*. Jul 2023, Tianjin. Tianjin; 2023, p. 854-858. <https://doi.org/10.1109/ICPET59380.2023.10367562>.
3. Harbi F. Al., Csala D. Saudi Arabia's electricity: energy supply and demand future challenges. In: *1st Global Power, Energy and Communication Conference*. 12–15 June 2019, Nevsehir. Nevsehir; 2019, p. 467-472. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778554>.
4. Wang Rizhao, Zhang Hengxu, Shi Fang, Zhang Yong, Zhang Lei. Empirical study of the relationship between global energy consumption and economic growth. In: *China International Electrical and Energy Conference*. 1 October 2017, Beijing. Beijing: IEEE; 2017, p. 394-399. <https://doi.org/10.1109/CIEEC.2017.8388480>.
5. Selvaraj M., Kulkarni S.M., Rameshbabu R. Performance analysis of a overhead power transmission line tower using polymer composite material. *Procedia Materials Science*. 2014;5:1340-1348. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.451>.
6. Reddy B.S., Mitra G. Investigations on high temperature low sag (HTLS) conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020;35(4):1716-1724. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2950992>.
7. Varivodov V.N., Kazakov S.E., Kulik V.V., Udarov V.M. Steel polyhedral supports for electrical distribution networks. Possibilities and prospects. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2005;2:37-42. (In Russ.). EDN: KUHWOV.
8. Hadzimuratovic S., Fickert L. Impact of gradually replacing old transmission lines with advanced composite conductors. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2018.8571614>.
9. Zhen Liu, Jian Zhang, Jiao Zhu, Dongyang Lin, Shengchun Liu, Cheng Yao. Development of high stress and large capacity conductor for large crossing transmission lines. In: *International Conference on Applied Physics and Computing*. 2022, Ottawa. Ottawa: IEEE; 2022, p. 248-251. <https://doi.org/10.1109/ICAPC57304.2022.00053>.
10. Fedorov N.A. New generation of wires and reliability issues of overhead lines. In: *Raboty sistem elektrosnabzheniya v usloviyah gololedno-vetrovyh nagruzok: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Power supply system operation under ice-wind loads: Proceedings of the International scientific and practical conference* 19 October 2016, Ufa. Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2016, p. 42-49. (In Russ.). EDN: XCKUKT.
11. Bingran Shao, Jin Liu, Yingmin Feng, Guangsheng Cui, Bo Yan, Guoqi Ren. Analysis on selecting application of energy-saving conductors in overhead transmission line construction. In: *China International Conference on Electricity Distribution*. 2016. <https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7576160>.
12. Lauria D., Quaia S. An investigation on line loadability increase with high temperature conductors. In: *6th International Conference on Clean Electrical Power*. 2017;645-649. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004757>.
13. Hoffman J., Reil M., Waters D.H., Wong C.K.W., M. Kumosa S.M. Evaluation of strains in dead-end fittings of high-temperature low sag electrical conductors using FBG sensors. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024;73. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3352708>.
14. Beryozkina S. Potential application of the advanced conductors in a transmission line project. In: *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*. 2018. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493858>.
15. David T., Dave B. How advanced conductors are improving the T&D system and combating climate change. In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2022. <https://doi.org/10.1109/TD43745.2022.9816899>.
16. Zuev E.N. To standards adaptation for economic density of current. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2002;6:39-45. (In Russ.).
17. Song Yanrong, Zeng Hubiao. Optimization design of the conductor section selection in the transmission line. In: *Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System*. 2011. <https://doi.org/10.1109/PACCS.2011.5990283>.
18. Savina N.V., Varygina A.O. Selection of an optimal cable brand for high-voltage overhead power lines based on criterion analysis. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):339-353. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>. EDN: PRKWCM.
19. Varygina A.O., Savina N.V. Technical and economic model of the conductor cross-section for active-adaptive electrical networks. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 2022;16(3):27-34. <https://doi.org/10.52547/mjee.16.3.27>.
20. Varygina A.O., Savina N.V. Calculating the current carrying capacity of the new generation overhead line conductors. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2020;22(4):3-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-3-15>. EDN: MSHLRM.
21. Saati T.L. Decision making with dependences and feedback, 2008, 360 p. (Russ. ed.: *Prinyatie reshenij pri zavisimostyah i obratnyh svyazyah: analiticheskie seti*. Moscow: LKI; 2008, 360 p.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Савина Наталья Викторовна,**

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой энергетики,
Амурский государственный университет,
675028, г. Благовещенск,
ул. Игнатьевское шоссе, 21, Россия
nataly-savina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3497-8819>

Варыгина Александра Олеговна,

аспирант,
Амурский государственный университет,
675028, г. Благовещенск,
ул. Игнатьевское шоссе, 21, Россия
✉ alleks_13@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3500-7723>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2024 г.; принята к публикации 07.09.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Natalia V. Savina,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Power Engineering,
Amur State University,
21, Ignatyevskoe Shosse St., Blagoveshchensk
675028, Russia
nataly-savina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3497-8819>

Aleksandra O. Varygina,

Postgraduate Student,
Amur State University,
21, Ignatyevskoe Shosse St., Blagoveshchensk
675028, Russia
✉ alleks_13@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3500-7723>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 03.08.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 07.09.2024.