



Научная статья

УДК 621.315.1:621.3.051

<https://elibrary.ru/prkwcm><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>

Выбор оптимальной марки провода высоковольтных воздушных линий электропередачи на основе критериального анализа

Н.В. Савина¹, А.О. Варыгина^{2✉}^{1,2}Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

Резюме. Цель – разработать универсальный инструмент выбора оптимальной марки провода воздушной линии для проектной практики, адаптированный под классические провода и провода нового поколения. Для реализации многокритериальной оценки влияющих параметров, факторов и ограничений при выборе марки провода использованы метод системного анализа – метод анализа иерархий, а также метод сравнительного анализа. Разработаны метод выбора оптимальной марки провода на основе метода анализа иерархии и алгоритм его применения при проектировании или реконструкции воздушных линий. Реализация метода и алгоритма показаны на примерах строительства и реконструкции воздушной линии 220 кВ с традиционным проводом марки АС и отечественными марками проводов нового поколения АСВТ, АСВП, АСк2у и АСТ. В рассмотренных примерах ограничениями технической реализуемости проекта нового строительства воздушной линии стало значение стрелы провеса, а для проекта реконструкции – значение удельной массы провода. Критериями отбора приняты длина пролета, стоимость провода и длительно допустимый ток. Наибольшее соответствие критериям отбора показали марки АСВП и АСТ со значениями 27,5% и 55,9%. Таким образом, при минимальных капитальных вложениях в проект для нового строительства воздушной линии марка АСВП обеспечивает оптимальную длину пролета, а при реконструкции линии – марка АСТ обеспечивает максимальную пропускную способность линии. Верификационные технико-экономические расчеты и анализ подтвердили корректность и преимущество применения метода выбора марки провода, основанного на методе анализа иерархий. На базе проведенных исследований установлено, что предложенный метод является универсальным несложным инструментом выбора марки провода, который позволяет определить оптимальный вариант, наилучшим образом отвечающий поставленным техническим и экономическим ограничениям и критериям реализации проекта в электросетевом комплексе.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, марка провода, провод нового поколения, метод анализа иерархий, критерий, конструкция

Для цитирования: 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. EDN: PRKWCM, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>.

POWER ENGINEERING

Original article

Selection of an optimal cable brand for high-voltage overhead power lines based on criterion analysis

Natalia V. Savina¹, Aleksandra O. Varygina^{2✉}^{1,2}Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

Abstract. This paper is aimed at developing a versatile approach to selecting an optimal cable brand for overhead transmission lines for use in design practice, adapted to conventional and new-generation cable types. To implement multi-criterion evaluation of external factors and limitations when selecting a cable type, the methods of systems, hierarchy and comparative analysis were used. A method for selecting an optimal cable brand based on hierarchy analysis was developed along with an algorithm for its implementation when designing new or modernizing existing overhead

lines. The developed approach is demonstrated on the example of construction and modernization of 220 kV overhead lines with the conventional AC cable and such new-generation domestic brands, as ACBT, ACBP, ACk2y and ACT. In the considered examples, the technical feasibility of the construction of a new overhead line was limited by the value of the sag. For the modernization project, the specific weight of the cable was of greater importance. The selection criteria included the span length, cable cost and admissible continuous current. The ACBP and ACT cable brands showed the greatest compliance with the selection criteria (27.5% and 55.9%, respectively). Therefore, at minimum capital investments, the ACBP brand ensures the optimum span length in the construction of a new overhead line, whereas the ACT brand ensures the maximum capacity in the modernization of an existing line. The conducted verification calculations confirmed the feasibility and versatility of the proposed method for selecting a cable brand.

Keywords: overhead power line, wire type, new generation wire, method of hierarchy analysis, criterion, construction

For citation: 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.). EDN: PRKWCM, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), когда речь заходит о выборе провода, то, как правило, традиционно все сводится к выбору его сечения. Исходя из опыта эксплуатации и проектирования признанных и нормативно закреплённых методов выбора сечения, в проектной документации для ВЛЭП различных классов номинального напряжения свыше 1 кВ наиболее частым решением является выбор сталеалюминевых проводов традиционной конструкции. Этот факт подтверждает конструктивное исполнение ВЛЭП электросетевого комплекса, как в России, так и за рубежом.

Анализируя наиболее распространённую справочную литературу, например³, можно отметить, что в ней зачастую приводится описание конструкций традиционных марок проводов, применяемых в ВЛЭП. Это марки М, А, Ап, АКП, АпКП, АС, АпС, АСКС, АпСКС, АСКП, АпСКП, АСК, АпСК, АН, АНКП, АЖ, АЖКП, которые при описании основных параметров и характеристик группируются в таблицы с одинаковыми данными: в первой группе это марки АС, АСКП, АСКС, АСК, АпС, АпСКП, АпСКС, АпСК, во второй группе – марки А, АКП, Ап, АпКП и в третьей группе – марка М. Однако в справочной литературе нет конкретных рекомендаций, алгоритмов, методов или методик по выбору непосредственно самой марки провода даже среди традиционных конструкций, а лидирующую позицию прочно занимает провод марки АС.

Таким образом, открытым остаются вопросы: как осуществлять выбор марки провода на практике, что на это может повлиять и является ли это необходимостью. Ведь даже традиционных марок достаточно немало, а с течением времени ряд марок проводниковой продукции только пополняется.

В качестве примера рассмотрим проект 2004 г. по выдаче мощности Калининградской ТЭЦ-2, где в разделе «Провода и грозозащитные тросы» для двухцепной ВЛ 110 кВ ТЭЦ-2 – ПС 330 кВ «Северная» выбран по электрическим нагрузкам: провод с расщеплёнными фазами – 2хАС240/32, а для реализации перехода выбор уже осуществлялся между проводами АС500/336 и АС500/243 с учетом требований прочностных характеристик, величин стрел провеса и простоты монтажа. При этом провод АС500/243 показал лучшие характеристики, обеспечивая минимальную высоту опор и снижение нагрузки от тяжения на 33%. Но в итоге экспертной оценки, учитывая еще и условия атмосферы (наличие вредных веществ) и близость Балтийского моря, для реализации перехода выбрана марка АСКС500/204. Таким образом, проектом для использования приняты две традиционные марки провода, которые, учитывая начальные условия и имеющиеся ограничения, позволили получить наиболее приемлемый вариант. И, несмотря на то, что в проекте сделан акцент на марку провода АС (безусловно, здесь стоит учесть год проекта: линейка марок была еще не настолько широка, как сейчас), показано, что другие

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

марки могут не только быть применимы, но и осуществлять лучшее соответствие проекту и поставленным целям. В то же время в проекте не раскрыты ни четкий алгоритм, ни механизм выбора марки провода. Определяющими факторами в таком случае являются знания и опыт проектировщика-эксперта.

По сравнению со временем, когда марок проводов было гораздо меньше и многие из них были подобны друг другу конструктивно, по параметрам и характеристикам, в настоящее время ряд марок существенно увеличился. И если раньше именно сечение определяло характеристики провода, а встретить применение или выбор другой марки провода, кроме марки АС, можно было достаточно редко, то теперь при одинаковом сечении различные марки проводов могут существенно отличаться по конструктивному исполнению и допустимому току из условий нагрева, весу и прочности провода единичной длины, сопротивлению и величине потерь [1] и разнообразие других марок можно встретить гораздо чаще.

Опыт применения проводов новых марок положительно себя зарекомендовал как в отечественной практике [2–4], так и за рубежом [5–7] за счет получаемых положительных эффектов, таких как повышение надежности [8], увеличение пропускной способности и срока эксплуатации ВЛЭП, снижение нагрузки на опоры, снижение электрических и тепловых потерь, получение меньшей стрелы провеса. Положительные эффекты в каждом конкретном случае применения той или иной марки провода могут быть различны.

Например, одним из признанных способов борьбы с гололедообразованием является применение провода марки AERO-Z [9]. Провода этой марки дороже проводов марки АС, поэтому, кроме стоимостных показателей, необходимо учитывать получаемые дополнительные эффекты. В противном случае инновационные решения, которые способны дать существенные преимущества, могут быть так и не выбраны. Например, в проекте 2014 г. для одноцепной ВЛЭП 220 кВ Фев-

ральск – Рудная, расположенной в Амурской области, выбран провод АС-300/39, одновременно с которым рассматривался на принципе «близости по сечению» провод AERO-Z-366-A3F. По причине более высокой стоимости он уступил марке АС, оценка эффектов не была произведена.

С развитием науки и техники, процесс выбора провода усложняется все сильнее, ведь появляется все больше новых марок, стоимость которых может как превышать традиционные решения, так и быть сопоставимой с ними (отечественные высокотемпературные провода АСВТ и АСВП сопоставимы по стоимости с проводами марки АС), а технические характеристики могут существенно отличаться за счет конструктивных особенностей.

Как показал анализ, вопрос выбора марки провода не раскрыт на сегодняшний день ни в справочниках, ни в монографиях, ни в других авторских работах. С учетом постоянного пополнения ряда марок проводов справочная литература просто не будет успевать за изменениями, к тому же все больше набирает обороты индивидуальное проектирование, постоянно меняются экономические условия, растут требования к электроэнергетическим объектам, а в нормативных документах⁴ отражены условия применения только провода АС. Заводы-изготовители публикуют отдельные брошюры по выпускаемым только ими проводам, которые не позволяют в полной мере систематизировать данные для нужд проекта, так как необходимо рассматривать различные варианты проводов и других изготовителей.

Таким образом, возникла острая необходимость в получении инструментария, который позволит осуществить выбор оптимального проектного решения по маркам для ВЛЭП.

Для упрощения работы и получения оптимальных проектных решений для сетевого комплекса ПАО «ФСК ЕЭС» выпущен стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» «Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поко-

⁴Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2008. 704 с.

ления»⁵, систематизирующий информацию по различным маркам проводов, отличных от сталеалюминевых, изготавливаемых по ГОСТ 839⁶. В этом стандарте приведена таблица с рекомендованными областями применения неизолированных проводов нового поколения для ВЛЭП напряжением 220 кВ и выше. Всего выделено 4 области: 1 – участки ЕНЭС для передачи большой мощности поставщиков электрической энергии; 2 – на ВЛЭП как альтернативный вариант ее перевода на более высокий класс напряжения, строительству двух цепей или увеличению сечения существующего провода; 3 – на больших переходах для соблюдения габаритных расстояний; 4 – на протяженных прямолинейных участках трассы ВЛ с возможностью снижения количества промежуточных опор. Каждой выделенной области соответствует несколько марок проводов, при этом ряд марок соответствует нескольким областям, а другие – всем четырем. К тому же в этом стандарте отражены не все существующие марки, а рекомендации даны только для классов напряжения 220 кВ и выше. В итоге проблема выбора марки провода для конкретного случая остается нерешенной. Для других электросетевых комплексов рассматриваемая проблема стоит еще острее.

Несмотря на получение различных положительных эффектов, при применении новых марок проводов необходимо принимать во внимание не только технические, но и экономические аспекты. Хорошо известно, что новые технические решения, как правило, являются более дорогостоящими по сравнению с традиционными, но могут быть и сопоставимы по стоимости.

Учитывая существующее разнообразие марок проводов, определение оптимального решения при строительстве новой ВЛЭП или модернизации / реконструкции действующей (в части выбора провода и его параметров) существенно усложнилось ввиду отсутствия какого-либо подхода или методики выбора

марки провода. Далее эта проблема имеет тенденцию только усиливаться, и, как показывает практика, ряд проводниковой продукции только пополняется.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор марки провода представляет собой многокритериальную задачу, которая должна учитывать совокупность различных факторов, параметров, условий и критериев, так как проектные решения должны быть обоснованы технически и экономически.

В современных условиях технико-экономическое обоснование должно строиться на большом количестве показателей и оценке возможности достижения различных положительных эффектов: снижении капитальных вложений и/или эксплуатационных издержек, повышении надежности и пропускной способности ВЛ, обеспечении безопасных габаритов проводов до земли и до пересекаемых объектов и т.д. В итоге определение некоего единого критерия, который будет подходить для любых случаев и условий проектирования не представляется возможным. Важно, чтобы принятое проектное решение максимально полно отвечало заданным условиям и критериям.

К тому же ранее выбор марки проводов практически не рассматривался, так как в основном при проектировании речь шла о сталеалюминевых проводах традиционной конструкции, которые являлись равнонадежными, отличными друг от друга по большей части только сечениями. Заложенные плановой экономикой принципы выбора провода из унифицированного ряда, безусловно, упрощали задачу, но устарели с течением времени. В результате на текущий момент просто отсутствует инструмент выбора оптимального провода из большого разнообразия предлагаемых технических решений заводов-изготовителей.

Целью работы является разработка универсального инструментария получения

⁵СТО 56947007-29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения. Введ. 01.07.2019. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2019.

⁶ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с изм. № 1-2). Введ. 01.01.1981. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.

обоснованного выбора марки провода любой конструкции, адаптированного к конкретным условиям проектирования ВЛЭП.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Требование многокритериальной оценки влияющих параметров, факторов и ограничений свидетельствует о необходимости использования системного анализа для выбора марок проводов с помощью соответствующего метода или методов. Для реализации многокритериального анализа существует свыше 70 методов [10], наиболее востребованным из которых в инвестиционно-строительной деятельности (к которой относятся проекты строительства, реконструкции и модернизации ВЛЭП) является метод анализа иерархий (МАИ) [11].

Американский экономист Т. Саати предложил МАИ (analytic hierarchy process) в 1966 г. [12].

В качестве основных характеристик метода можно выделить:

- практически неограниченную область использования;
- практически неограниченную размерность поставленной задачи;
- прозрачность используемых процедур метода;
- шаблонность верификационных процедур;
- достоверность полученного результата.

Данные характеристики позволяют объяснить высокую востребованность метода. МАИ активно используется и предлагается к использованию не только в экономике, но и в энергетике. Примерами могут являться обоснованные предложения применения МАИ для экспертной диагностики технического состояния современного трансформаторного оборудования [13], выбора наиболее подходящего по заданным условиям места размещения ветряных электростанций [14], организации молниезащиты в распределительных сетях [15], определения приоритета устранения повреждений линий электропередачи после происшествий [16], планирования обслуживания линий электропередачи [17].

Таким образом, МАИ направлен на поиск варианта, который наилучшим образом поз-

воляет решить проблему с выполнением соответствующих требований и условий.

Суть реализации МАИ заключается в парном сравнении альтернативных (возможных) вариантов для каждого отдельного из имеющихся критериев с использованием сравнительной шкалы, так называемой шкалы сравнительной важности.

Адаптация алгоритма метода применительно к выбору марки провода будет выглядеть следующим образом:

1. Определение основной цели выбора марки провода и выбор ограничительных условий: осуществляется для рассматриваемой проблемы.

2. Определение основных критериев отбора: особенности метода позволяют задаться как одним критерием выбора (например, значение длительно допустимого тока), так и несколькими; ограничений по количеству критериев нет. Но здесь нужно понимать, что чем больше взято критериев к рассмотрению, тем больше становится размерность задачи. К тому же, необходимо учитывать, что критерии могут быть как равнозначными, так и нет.

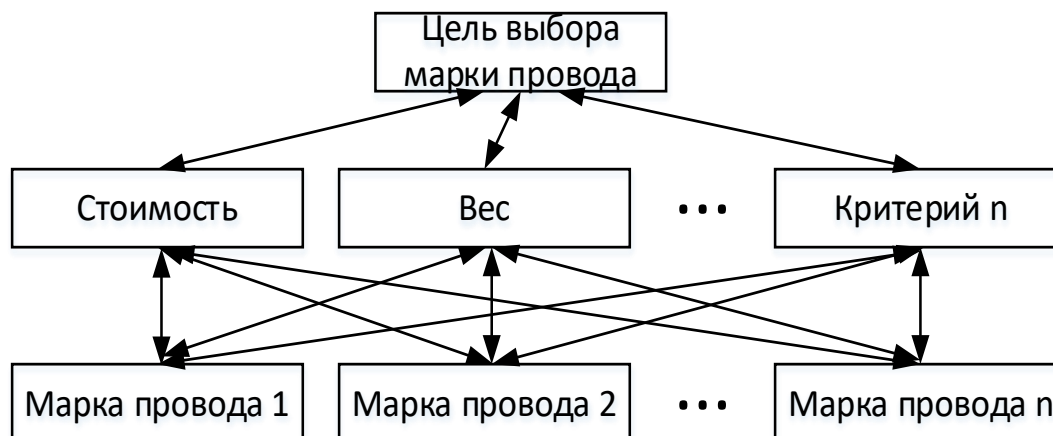
3. Подготовка исходной информации о ВЛЭП: формируются данные, необходимые для оценки ограничений и сравнения по выделенным критериям в явном виде или в необходимом для их расчета количестве.

4. Определение по утвержденным нормативным документам сечения сталеалюминового провода традиционной конструкции: реализуется после получения информации о токовой нагрузке линии и климатогеографическом расположении ВЛЭП, носит предварительный характер.

5. Формирование альтернативных (взаимоисключающих) вариантов марок проводов, отвечающих условиям сопоставимости: экспертным путем формируется перечень альтернативных марок проводов, применение которых возможно в заданных условиях.

6. Построение иерархии от поставленной цели через критерии к альтернативным вариантам марок провода.

Классическое построение иерархии в соответствии с МАИ в общем виде показано на рисунке.



Построение иерархии выбора марки провода
 Building a wire type selection hierarchy

7. Формирование матрицы попарных сравнений критериев и альтернативных вариантов марок провода по критериям.

В общем виде матрица сравнений M имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i1} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} – элемент матрицы.

Очевидно, что диагональные элементы матрицы сравнений равны 1.

В некоторых случаях матрицы сравнений удобно представлять в виде таблиц. В даль-

нейшем по тексту работы сравнение показано в табличном виде.

Попарное сравнение осуществляется по качественной шкале с присвоением баллов, указанных в табл. 1.

8. Анализ полученных матриц включает в себя нахождение суммы элементов каждого столбца, осуществление нормировки матрицы, расчет среднего значения для каждой строки – веса критериев.

Формула суммы элементов по столбцу имеет следующий вид:

$$S_j = a_{1j} + a_{2j} + \dots + a_{nj}, \quad (2)$$

где j – номер столбца.

Таблица 1. Качественная шкала оценки

Table 1. Qualitative rating scale

Балл	Определение
9	Принципиально лучше (очень сильное превосходство)
8	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 9 и 7
7	Характеристика данной марки провода значительно лучше (значительное превосходство)
6	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 7 и 5
5	Лучше по критерию (существенное превосходство)
4	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 5 и 3
3	Данная марка провода немного лучше следующей марки по критерию (умеренное превосходство)
2	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 3 и 1
1	Одинаковая характеристика по критерию
1/3	Данная марка провода немного хуже следующей по критерию
1/5	Хуже по критерию
1/7	Характеристика данной марки провода значительно хуже
1/9	Принципиально хуже
1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Используются промежуточные баллы при наличии промежуточного мнения между 1 и 1/3, 1/3 и 1/5, 1/5 и 1/7, 1/7 и 1/9

Нормировка матрицы включает в себя деление всех элементов матрицы на сумму элементов соответствующего столбца:

$$A_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j}. \quad (3)$$

Последующий расчет среднего значения по каждой строке позволит получить весовой столбец критериев по цели.

9. Расчет весов альтернативных вариантов по системе иерархии: матрично (по правилу «строка на столбец») перемножаются обобщенные результаты по критериям с весами критериев.

10. Выбор варианта проекта, наиболее полно отвечающего поставленным целям и задачам: по полученным результатам (в долевом или процентном виде) принимается за оптимальный вариант марка провода с наибольшим значением по сравнению с остальными.

Еще раз отметим, что чем больше факторов и альтернативных вариантов при реализации МАИ рассматривается, тем больше будет размерность матриц (таблиц) и количество потраченного времени.

Немаловажным аспектом, который можно отнести к своего рода недостатку метода, является необходимость многократного, достоверного и при этом объективного сравнения, что может вызвать в ряде случаев определенные сложности.

Для упрощения применения МАИ возможно использовать следующее:

1. Логику транзитивности – при заполнении матриц есть возможность ускорения их заполнения в два раза (т.е. если характеристика данной марки провода по критерию лучше характеристики другой марки провода, то марка второго провода хуже первой марки провода по этой же характеристике – выставляются баллы 5 и 1/5, соответственно).

2. Выбор множества Парето при равнозначных критериях – его свойство заключается в том, что любая из альтернативных марок провода, входящих во множество Парето, как минимум по одному критерию лучше любой другой, входящей в это множество. В итоге

при выборе множества Парето все альтернативы попарно сравниваются друг с другом по всем критериям, а если оказывается, что какая-либо альтернатива не лучше другой ни по одному критерию, то ее можно исключить из рассмотрения (неперспективная альтернатива далее не рассматривается).

3. Декомпозиция структуры задачи – сведение задачи к большему числу малоразмерных матриц сравнения. С уменьшением размерности матриц сравнения возможно и уменьшение шкалы с 9-ти до 5-балльной.

4. Использование различных программных средств – реализация МАИ возможна как с использованием стандартных программ различных математических пакетов, так и с использованием специальных уже готовых или самостоятельно разработанных. В [18] представлена информация об 11 зарубежных и отечественных программах, реализующих МАИ.

Для апробации предложенного инструмента рассмотрим два случая классического применения МАИ для выбора марки провода и оценки получаемых результатов без упрощений по пунктам 2–4.

Проекты нового строительства ВЛЭП, их реконструкции и модернизации электросетевыми компаниями зачастую реализуются через инвестиционные программы, по которым источник финансирования жестко ограничен. Поэтому на практике проекты с наименьшими капитальными вложениями могут выглядеть наиболее привлекательно и реализовываться быстрее.

В то же время обоснование доходности инвестиционных проектов очень важно для сетевых компаний и для потребителей, так как размеры тарифов изменяются обратно пропорционально объему передаваемой электроэнергии.

Для каждого исследуемого случая зададимся различными целями:

Цель 1 (новое строительство) – выбор марки провода из заданного ряда, которая позволит получить оптимальную длину пролета при наименьших капитальных вложениях в проект.

Цель 2 (реконструкция) – выбор марки провода из заданного ряда, которая позволит

получить повышение пропускной способности ВЛ без замены существующих опор при получении максимальной выручки от передачи электроэнергии.

Исходя из поставленных целей, *условиями* отбора марок проводов ВЛЭП являются: в первом случае – стрела провеса, во втором случае – непревышение удельной массы провода (веса).

Критериями отбора для первого случая являются длина пролета (критерий 1.1) и стоимость провода (критерий 2), для второго случая – длительно допустимый ток (критерий 2.1) и стоимость (критерий 2).

Исходные условия для первого случая (пример): рассматривается ВЛЭП 220 кВ длиной 250 км, расположенной на территории границы Чукотского автономного округа и Магаданской области на опорах типа ПС220-5М с высотой подвеса проводов 20,6 м, наименьшее допустимое расстояние до земли – 6,0 м, габаритная стрела провеса – 13,6 м. Климатические условия: минимальная температура -64°C , максимальная – $+33^{\circ}\text{C}$, ветер – 80 даН/мм² (IV зона), при гололеде – 20,0 даН/мм², гололед – 30 мм (V зона). Исходя из токовой нагрузки ВЛ и метода экономической плотности тока, в качестве базового рассматривается провод марки с сечением АС 400/93, который, безусловно, подходит для выполнения первой цели и в случае отсутствия других марок проводов был бы принят в проекте к дальнейшей реализации, но недостаточен для второй цели.

Заданный ряд включает в себя отечественные марки проводов, применение которых возможно для ВЛЭП 220 кВ и, исходя из цели 1, позволяет обеспечить соблюдение габаритных расстояний:

– АС – базовая марка – традиционный сталеалюминевый провод, характеристики которого приняты за контрольные значения и условия.

– АСВТ представляет собой неизолированный сталеалюминевый высокотемпературный провод одинарной свивки с линейным касанием проволок типа ЛК-О и ЛК-Р с пла-

стически обжатыми стальной и алюминиевой частями. Кроме того, что провода этой марки обладают повышенным механическим ресурсом, установлено, что при одинаковом диаметре по сравнению с маркой АС он обеспечивает превышение длительно допустимого тока на 30–35%. Марка позволяет получить увеличение длины пролета до 40%, снижение ветровой нагрузки – на 25–40%. Интенсивность образования гололеда ниже на 10–12% [19].

– АСВП представляет собой высокопрочный сталеалюминевый провод одинарной навивки с линейным касанием проволок типа ЛК-О и ЛК-Р с пластически обжатыми стальной и алюминиевой частями провода, зачастую в специализированной литературе рассматривается совместно с маркой АСВТ.

– АСк2у представляет собой неизолированный компактированный провод, который состоит из стального сердечника (проволами с цинко-алюминевым покрытием) и нескольких концентрических повивов профилированных алюминиевых проволок трапециевидной формы. Исследования проводов данной марки показали, что они обеспечивают увеличенную механическую прочность, снижение действия гололеда на 3–9%, снижение возможного ущерба от недоотпуска электроэнергии, снижение потерь мощности на корону на 40–50% по сравнению с проводами марки АС [20].

– АСТ – термостойкий провод из алюминиевого сплава (Al-Zr) со стальным сердечником. В качестве преимуществ данного провода заявлены снижение времени на плавку гололеда и связанные издержки из-за высокой термической стойкости, повышение надежности ВЛЭП, усиленная механическая и термическая стойкость, возможность передачи больших токов по сравнению с проводом марки АС⁵.

Представим в табл. 2 характеристики проводов рассматриваемых марок, сопоставимых по сечению алюминиевой (токопроводящей) части с базовым проводом, по первым трем строкам для общей информации и

⁵Инновационные конструкции неизолированных проводов: каталог проводниковой продукции Ункомтех. М., 2021. 39 с.

информацию по критериям и контролю условий. Данные по характеристикам взяты из стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» «Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения»⁷, а по стоимости – из технико-коммерческих предложений производителей на уровне цен 2020 г. Габаритный пролет определен при условии нагрева провода до максимальной температуры 33°C.

Выбранные марки проводов и указанные сечения соответствуют условиям отбора: стрелы провеса всех проводов не превышают предельного значения, а вес 1 км провода указанных марок не превышает значения для провода АС400/93. Следовательно, все провода могут быть взяты к дальнейшему рассмотрению.

Учитывая, что некоторые варианты по отдельным характеристикам обладают схожими или одинаковыми значениями, то сложность выбора, не используя никакого инструмента и метода, существенно возрастает.

Сравнение марок по обозначенным критериям первого случая приведено в табл. 3–4.

При сравнении удобно сразу определить с минимальными и максимальными значениями по критериям. Соответственно, марка провода с наилучшим значением будет иметь принципиальные преимущества по сравнению с маркой с наихудшим значением по критерию, что позволяет легко и быстро

поставить значения 9 и 1/9 в таблице или матрице. По диагонали проставляются единицы.

Во втором случае провод АС400/93 не позволяет обеспечить требуемую пропускную способность, следовательно, не берется в рассмотрение. С учетом того, что АСВП403/61 по длительно допустимому току немного уступает базовой марке, то к дальнейшему анализу может не приниматься. Исключая неподходящие варианты, удастся снизить размерность решаемой задачи. Можно также использовать значения качественной шкалы сравнения до 5. Результаты представлены в табл. 5.

Результаты нормировки матриц по вышеуказанным критериям и нахождение средних значений представлены в табл. 6–8.

После нормировки по критерию 1.1 (табл. 6) отчетливо видно, что наибольшим расчетным средним значением по критерию обладает провод марки АСк2у, которому соответствует максимальное, в данном случае наилучшее значение характеристики (411 м).

После нормировки по критерию 2 (табл. 7) отчетливо видно, что наибольшее расчетное среднее значение по критерию принадлежит проводу марки АСВП, которому соответствует минимальное значение характеристики (наилучшее).

Сведем рассчитанные столбцы средних значений в единую табл. 9.

Таблица 2. Характеристики проводов рассматриваемых марок
Table 2. Characteristics of wire types under consideration

Марка провода	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Диаметр, мм	29,1	24,75	25,2	26,3	29,1
Сечение провода, мм ²	499,05	388,6	403,4	493	499,2
Эл. сопротивление постоянному току при 20°C, Ом/км	0,0711	0,075	0,072	0,0707	0,0732
Длительно допустимый ток, А	830	1353	826	1178	2037
Вес, кг/км	1851	1591	1651	1840	1851
Стоимость, руб/км	495 905	475 000	441 000	533 600	555 300
Длина пролета, м	408	383	389	411	400
Стрела провеса, м	12,9	12,8	12,8	12,9	13,3

Таблица 3. Сравнение марок проводов по критерию 1.1
Table 3. Wire type comparison according to criterion 1.1

Критерий длины пролета	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
АС 400/93	1	8	7	1/2	4
АСВТ 389/59	1/8	1	1/3	1/9	1/6
АСВП 403/61	1/7	3	1	1/8	1/5
АСк2у 400/93	2	9	8	1	5
АСТ 400/93	4	6	5	1/5	1
Сумма	7,268	27,000	21,333	1,936	10,367

Таблица 4. Сравнение марок проводов по критерию 2
Table 4. Wire type comparison according to criterion 2

Критерий стоимости	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у400/93	АСТ400/93
АС 400/93	1	1/3	1/5 (0,200)	5	6
АСВТ 389/59	3	1	1/3 (0,333)	6	7
АСВП 403/61	5	3	1	8	9
АСк2у 400/93	1/5 (0,200)	1/6 (0,167)	1/8 (0,125)	1	3
АСТ 400/93	1/6 (0,167)	1/7 (0,143)	1/9 (0,111)	1/3 (0,333)	1
Сумма	9,367	4,643	1,769	20,333	26,000

Таблица 5. Сравнение марок проводов по критерию 2.1
Table 5. Wire type comparison according to criterion 2.1

Критерий по длительно допустимому току	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
АСВТ 389/59 1353	1	3	1/4
АСк2у 400/93 1178	1/3	1	1/5
АСТ 400/93 2037	4	5	1
Сумма	5,333	9,000	1,450

Таблица 6. Нормировка по критерию 1.1
Table 6. Normalizing by criterion 1.1

Нормирование, длина пролета	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93	Среднее значение
АС 400/93	0,138	0,296	0,328	0,258	0,386	0,281
АСВТ 389/59	0,017	0,037	0,016	0,057	0,016	0,029
АСВП 403/61	0,020	0,111	0,047	0,065	0,019	0,052
АСк2у 400/93	0,275	0,333	0,375	0,516	0,482	0,396
АСТ 400/93	0,550	0,222	0,234	0,103	0,096	0,241

Таблица 7. Нормировка по критерию 2
Table 7. Normalizing by criterion 2

Нормирование, критерий стоимости	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93	Среднее значение
АС 400/93	0,107	0,072	0,113	0,246	0,231	0,154
АСВТ 389/59	0,320	0,215	0,188	0,295	0,269	0,258
АСВП 403/61	0,534	0,646	0,565	0,393	0,346	0,497
АСк2у 400/93	0,021	0,036	0,071	0,049	0,115	0,058
АСТ 400/93	0,018	0,031	0,063	0,016	0,038	0,033

Таблица 8. Нормировка по критерию 2.1
Table 8. Normalizing by criterion 2.1

Критерий по длительно допустимому току	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93	Среднее значение
АСВТ 389/59	0,188	0,333	0,172	0,231
АСк2у 400/93	0,062	0,111	0,138	0,104
АСТ 400/93	0,750	0,556	0,690	0,665

Таблица 9. Обобщенная таблица сравнения по критериям
Table 9. Generalized criteria-based comparison table

Случай	Первый		Второй	
	критерий 1.1	критерий 2	критерий 2.1	критерий 2
АС 400/93	0,281	0,154	–	–
АСВТ 389/59	0,029	0,258	0,231	0,258
АСВП 403/61	0,052	0,497	–	–
АСк2у 400/93	0,396	0,058	0,104	0,058
АСТ 400/93	0,241	0,033	0,665	0,033

Поскольку не всегда приходится сталкиваться с равнозначными критериями, то они также нуждаются в оценке. Для проведения исследования и учитывая его цель, примем, что в первом случае имеем дело с равнозначными критериями (вес каждого такого критерия 0,5), тогда как во втором случае наиболее важен критерий 2.1 (вес такого критерия 0,833, в то время как вес критерия 2 составит 0,167).

Умножая полученную матрицу на столбец по правилу «строка на столбец» (матрично), получаем веса альтернатив с точки зрения достижения цели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результат применения метода, выраженный в долевым и процентном соответствии установленным критериям по первому случаю, представлен в табл. 10.

Результаты при наиболее важном критерии 2.1 представлены в табл. 11.

Для второго случая если принять критерии равнозначными, то итоговый результат будет выглядеть так, как показано в табл. 12.

По приведенным расчетам определены варианты реализации проектов, наиболее полно отвечающие поставленным целям и задачам:

– для первого случая – марка АСВП обеспечивает оптимальную длину пролета при минимальных капитальных вложениях в проект;

– для второго случая – марка АСТ 400/93 обеспечивает максимальную пропускную способность.

Таким образом, для первой цели выбран не вариант АС400/93, встречающийся наиболее часто и который можно выбрать по существующим методам и нормативной документации, и не вариант АСВТ389/59 с наименьшей характеристикой по длине пролета, а вариант АСВП403/61. Для выполнения же второй цели, учитывая существенно превосходящее значение по критерию длительно допустимого тока, выбран самый дорогостоящий вариант АСТ400/93, который позволяет получать максимальную выручку по передаче электроэнергии и обходиться без дополнительных технических решений для поставленной цели.

В качестве примера показана корректность выбора для первой поставленной цели, которую можно оценить по значению капитальных вложений. В табл. 13 показаны результаты верификационных расчетов. При этом стоимость провода рассчитана с использованием коэффициента инфляции, так как стоимость 1 км провода в табл. 2 приведена на 2020 г.

Таблица 10. Результаты реализации метода анализа иерархий для 1 случая
Table 10. Results of hierarchy analysis method implementation for the case 1

Марка	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Итоговый результат в долях	0,218	0,144	0,275	0,227	0,137
Итоговый результат в %	21,8	14,4	27,5	22,7	13,7

Таблица 11. Результаты реализации метода анализа иерархий для 2 случая
Table 11. Results of hierarchy analysis method implementation for the case 2

Марка	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Итоговый результат в долях	0,236	0,096	0,559
Итоговый результат в %	23,6	9,6	55,9

Таблица 12. Результаты реализации метода анализа иерархий для 2 случая после переоценки критериев
Table 12. Results of hierarchy analysis method implementation for the case 2 after criteria re-evaluation

Марка	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Итоговый результат в долях	0,244	0,081	0,349
Итоговый результат в %	24,4	8,1	34,9

Таблица 13. Верификационные расчеты
Table 13. Verification calculations

Марка	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Стоимость провода, руб.	412 005 560,5	394 637 362,5	366 389 635,5	443 323 150,8	461 351 847,2
Длина пролета промежуточной опоры, м	279	262	275	282	274
Количество промежуточных опор, шт.	896	954	909	886	912
Стоимость промежуточной опоры, руб.	1 003 560 руб. ⁸				
Стоимость фундаментов под одну опору, руб.	240 000 руб. ⁹				
Оценка капитальных вложений при новом строительстве (провод+опоры+ фундаменты), млн руб.	1526,235	1580,994	1496,786	1545,117	1595,479

Капитальные вложения определяются как «ориентировочные» по данным заводов-изготовителей и поставщиков, так как фактические значения определяются по коммерческим предложениям и результатам закупочных процедур в зависимости от поставщика, места доставки, точного количества поставки и комплектации^{8,9}.

Верификационные расчеты подтвердили полученные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При реализации алгоритма выбора марки провода по МАИ установлено, что:

– целесообразно внедрение метода в отраслевую практику выбора проводов, учиты-

⁸Электropоставка. Федеральный поставщик опорных конструкций ЛЭП, контактных сетей и освещения // Промежуточная опора ПС220-5 [Электронный ресурс]. URL: <https://elektropostavka.ru/store/catalog/oporyi-lep/metallicheskie-oporyi-lep/metallicheskie-reshetchatyie-oporyi/11260> (22.01.2023).

⁹Электropоставка. Федеральный поставщик опорных конструкций ЛЭП, контактных сетей и освещения // Фундаменты опор ЛЭП [Электронный ресурс]. URL: <https://elektropostavka.ru/store/catalog/fundamentyi-opor-lep> (22.01.2023).

вая его прикладной потенциал в электро-энергетике, многокритериальность и отсутствие ограничений на размерность решаемой задачи;

– изменение весов критериев может приводить к получению различных результатов выбора, следовательно, в результате получается «оптимальный» вариант, который наилучшим образом отвечает именно поставленным целям и задачам;

– полученные результаты выбора легко интерпретируются;

– метод работает для провода любого сечения каждой выбранной конструкции.

Важно отметить, что реализация метода направлена не на одновременный выбор и марки провода и его сечения. МАИ при выборе марки позволяет выработать рекомендации для применения того или иного альтер-

нативного варианта в конкретных условиях и конкретной заданной цели. Для выбора сечения провода необходимо проводить дополнительные технико-экономические расчеты. При получении результатов по МАИ, отличающихся не более чем на 5%, в дальнейшем рассмотрение могут быть взяты несколько марок проводов, попавшие в этот интервал. В любом случае использование предлагаемого метода позволяет существенно сократить количество альтернативных вариантов и получить наиболее оптимальный из рассматриваемых.

В результате исследования впервые предложен универсальный метод выбора марки проводов любой конструкции ВЛЭП свыше 1 кВ, позволяющий получать экономические и технические эффекты.

Список источников

1. Варыгина А.О., Савина Н.В. Оценка целесообразности применения на ВЛ проводников нового поколения // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 27 октября 2017 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2017. С. 50–55.
2. Пехтелева В.Р., Осминкин Е.Д., Шевченко Н.Ю. Провода нового поколения российского производства // Инновации в науке и практике: матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Барнаул, 26 декабря 2018 г.). Уфа: Дендра, 2018. Ч. 1. С. 225–230.
3. Тимашова Л.В., Никифоров Е.П., Назаров И.А., Мерзляков А.С., Ермошина М.С., Качановская Л.И. [и др.]. Повышение надёжности и снижение эксплуатационных затрат ВЛ // Энергия единой сети. 2014. № 5. С. 6–14.
4. Васюра Ю.Ф., Глазырин М.А., Плешкова Т.А. Условие экономической целесообразности сооружения линий электропередачи с применением проводов с улучшенными характеристиками // Аллея науки. 2017. Т. 2. № 15. С. 647–650.
5. Reddy S.B., Mitra G. Investigations on high temperature Low Sag (HTLS) conductors// IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. Iss. 4. P. 1716–1724. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2950992>.
6. 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>.
7. Lew J. Aluminum-calcium composite conductors: the future of america's power grid // IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference. 2020. <https://doi.org/10.1109/URTC51696.2020.9668908>.
8. Долгопол Т.Л., Мишин Д.С. Повышение надёжности воздушных линий электропередачи // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сб. матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. (г. Кемерово, 19–21 декабря 2018 г.). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018. С. 220.1–220.5.
9. Ленский С.В., Ли В.Н. Исследование явления гололедообразования на проводах ЛЭП и способов борьбы с ним // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2018. Т. 1. С. 185–189.
10. Нефедов А.С. Сравнительный анализ метода ELECTRE III и метода анализа иерархий при решении многокритериальных задач // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 2. С. 9–15.
11. Наумов А.Е., Щенятская М.А. Практические аспекты использования метода анализа иерархий для политикри- териального сравнительного анализа портфельных альтернатив // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 223–227. <https://doi.org/10.12737/24127>.
12. Saaty T.L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill International, 1980. 150 p.
13. Manusov V.Z., Orlov D.V., Frolova V.V. Diagnostics of technical state of modern transformer equipment using the analytic hierarchy process // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. 2018. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493904>.
14. Elmahmoudi F., Abra O.E.K., Raihani A., Serrar O., Bahatti L. GIS based fuzzy analytic hierarchy process for wind energy sites selection in Tafaya Morocco // IEEE International Conference of Moroccan Geomatics. 2020.

<https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121921>.

15. Hai-bo Su, Min-chuan Liao, Lu Qu, Han-sheng Cai, Yu Zhang, Rui-fa Feng. Application of comprehensive evaluation for lightning protection scheme in distribution line on analytic hierarchy process // 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (Chongqing, 8–11 April 2021). Chongqing: IEEE, 2021. P. 152–157. <https://doi.org/10.1109/ACPTEE51499.2021.9436987>.
16. Yu Hong, Ma Yi, Wang Longfei, Zhai Yongsai, Du Zhijie. A method for evaluating the rescue priority level of power line post-disaster based on AHP // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (Takamatsu, 6–9 August 2017). Takamatsu: IEEE, 2017. P. 35–39. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8015784>.
17. Lin Zhiling, Gao Liqun, Zhang Dapeng, Ren Ping, Li Yang. Application of analytic hierarchy process in power lines maintenance // 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (Dalian, 21–23 June 2006). Dalian: IEEE, 2006. P. 7596–7599. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2006.1713443>.
18. Латыпова В.А. Сравнительный анализ и выбор программных средств, реализующих метод анализа иерархий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. № 4. С. 322–347. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.23.4.024>.
19. Курьянов В.Н., Швеи Е.С., Тимашова Л.В., Фокин В.А. Применение отечественных инновационных высокотемпературных проводов АСВТ для ВЛ 110 кВ и их эффективность // Энергия единой сети. 2017. № 5. С. 12–18.
20. Васюра Ю.Ф., Глазырин М.А., Плешкова Т.А., Черепанова Г.А. Оценка экономической целесообразности строительства высоковольтных линий электропередачи с применением проводов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 3. С. 71–74.

References

1. Varygina A.O., Savina N.V. Assessing application feasibility of a new conductor generation on overhead lines. *Sovremennye tekhnologii: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sbornik statej X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern technologies: topical issues, achievements and innovations: collected articles of 10th International scientific and practical conference*. 27 October 2017. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2017. S. 50–55.
2. Pekhteleva V.R., Osminkin E.D., Shevchenko N.Yu. New generation of wires produced in Russia. *Innovacii v nauke i praktike: materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Innovations in science and practice: materials of 13th International scientific and practical conference*. 26 December 2018, Barnaul. Ufa: Dendra; 2018, part 1, p. 225–230. (In Russ.).
3. Timashova L.V., Nikiforov E.P., Nazarov I.A., Merzlyakov A.S., Ermoshina M.S., Kachanovskaya L.I., et al. New conductor types application for overhead transmission lines. *Energiya edinoj seti*. 2014;5:6–14. (In Russ.).
4. Vasyura Yu.F., Glazyrin M.A., Pleshkova T.A. Economic feasibility of power line construction using wires with improved characteristics *Alleya nauki*. 2017;2(15):647–650. (In Russ.).
5. Reddy S.B., 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>.
6. 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>.
7. Lew J. Aluminum-calcium composite conductors: the future of America's power grid. In: *IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference*. 2020. <https://doi.org/10.1109/URTC51696.2020.9668908>.
8. Dolgopol T.L., Mishin D.S. Improving reliability of overhead transmission lines. In: *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika: sbornik materialov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Energy and Energy Saving: Theory and Practice: collected materials of 4th All-Russian scientific and practical conference*. 19–21 December 2018, Kemerovo. Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva; 2018, p. 220.1–220.5.
9. Lensky S.V., Lee V.N. Study of the phenomenon of icing generation on the wires of power lines and ways of dealing with IT. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke*. 2018;1:185–189.
10. Nefedov A.S. Comparative analysis of the ELECTRE III method and the hierarchy analysis for solving multicriteria problems. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2018;2:9–15. (In Russ.).
11. Naumov A.E., Shchenyatskaya M.A. Practical issues of using the analytic hierarchy process in multi-criteria analysis of portfolio alternatives. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2017;1:223–227. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/24127>.
12. Saaty T.L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill International; 1980, 150 p.
13. Manusov V.Z., Orlov D.V., Frolova V.V. Diagnostics of technical state of modern transformer equipment using the analytic hierarchy process. 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.2018.8493904>.
14. Elmahmoudi F., Abra O.E.K., Raihani A., Serrar O., Bahatti L. GIS based fuzzy analytic hierarchy process for wind energy sites selection in Tarfaya Morocco. In: *IEEE International Conference of Moroccan Geomatics*. 2020. <https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121921>.
15. Hai-bo Su, Min-chuan Liao, Lu Qu, Han-sheng Cai, Yu Zhang, Rui-fa Feng. Application of comprehensive

evaluation for lightning protection scheme in distribution line on analytic hierarchy process. In: *6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. 8–11 April 2021, Chongqing. Chongqing: IEEE; 2021, p. 152-157. <https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436987>.

16. Yu Hong, Ma Yi, Wang Longfei, Zhai Yongsai, Du Zhijie. A method for evaluating the rescue priority level of power line post-disaster based on AHP. In: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 6–9 August 2017, Takamatsu. Takamatsu: IEEE; 2017, p. 35-39. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8015784>.

17. Lin Zhiling, Gao Liqun, Zhang Dapeng, Ren Ping, Li Yang. Application of analytic hierarchy process in power lines maintenance. In: *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 21–23 June 2006, Dalian. Dalian: IEEE; 2006, p. 7596-7599. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2006.1713443>.

18. Latypova V.A. A comparative analysis and a choice of tools implementing analytic hierarchy process. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii*. 2018;6(4):322-347. (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.23.4.024>.

19. Kur'yanov V.N., Shvec E.S., Timashova L.V., Fokin V.A. Application of innovative domestic high-temperature ASVT wires for 110 kV overhead lines and their efficiency. *Energiya edinoj seti*. 2017;5:12-18. (In Russ.).

20. Vasyura Yu.F., Glazyrin M.A., Pleshkova T.A., Cherepanova G.A. Evaluating economic feasibility of high-voltage power line construction using new generation of wires. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2014;3:71-74. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савина Наталья Викторовна,

д.т.н., профессор,
заведующая кафедрой энергетики,
Амурский государственный университет,
675028, г. Благовещенск, 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, Игнатьевское шоссе, 21,
Россия
✉ alleks_13@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3500-7723>

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 31.01.2022; одобрена после рецензирования 09.03.2023; принята к публикации 12.04.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia V. Savina,

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

Aleksandra O. Varygina,

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

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 31.01.2022; approved after reviewing 09.03.2023; accepted for publication 12.04.2023.