

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.3.05

УДК 621.315.668

Л.В. Быковская, А.В. Штрамель

Оренбургский государственный университет, Оренбург,
Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОР ВЛ 110 кВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Повсеместное техническое перевооружение генерирующих электростанций, распределительных сетей и преобразовательного оборудования является чрезвычайно эффективным способом обеспечения бесперебойного питания всех категорий надежности электроснабжения потребителей. Опоры воздушных линий (ВЛ) электропередачи 110 кВ являются одним из наиболее важных элементов электрических сетей. Залогом успешной модернизации ВЛ является правильный выбор материала, из которого изготавливаются опоры. **Цель исследования:** разработка рекомендаций по модернизации опор воздушных линий электропередачи. **Методы:** традиционный метод проектирования ВЛ, алгоритм программы основан на нечетком выводе Мамдани. **Результаты:** проведен анализ научно-технической литературы в области использования опор ВЛ 110 кВ, изготовленных из различных материалов, и определены основные достоинства и недостатки каждого рассмотренного типа опор. Спроектированы двухцепные трассы ВЛ 110 кВ на железобетонных и композитных опорах, а также разработана прикладная программа для проектирования двухцепных трасс ВЛ, позволяющая упростить первоначальный выбор минимального сечения провода марки АС и рекомендуемого материала опор по значениям ожидаемого рабочего тока, предполагаемого срока службы и ориентировочной стоимости возведения одного погонного метра трассы ВЛ. Осуществлен обзор преимуществ от внедрения композитных опор при проведении капитального ремонта воздушных линий, реконструкции линий электропередачи (ЛЭП) с истекшим сроком эксплуатации и при возведении новых электрических сетей. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы при проектировании двухцепных ВЛ напряжением 110 кВ.

Ключевые слова: опоры линий электропередачи, композитные опоры, нормативный срок службы опор, унифицированные промежуточные опоры, нечеткий вывод Мамдани.

L.V. Bykovskaya, A.V. Shtramel

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

RESEARCH OF SUPPORTS OF VL 110 KV MADE FROM DIFFERENT MATERIALS

Widespread technical re-equipment of generating power plants, distribution networks and converter equipment is an extremely effective way to ensure uninterrupted power supply to all categories of reliability of power supply to consumers. Supports of 110 kV overhead transmission lines (overhead lines) are one of the most important elements of electrical networks. The key to successful modernization of overhead lines is the correct choice of the material from which the supports are made. **The purpose of the study:** to develop recommendations for the modernization of overhead power transmission poles. **Methods:** the traditional method of overhead line design, the program algorithm is based on the fuzzy output of Mamdani. **Results:** the analysis of scientific and technical literature in the field of the use of 110 kV overhead line supports made of various materials was carried out, and the main advantages and disadvantages of each type of supports considered were determined; double-chain routes of 110 kV overhead lines on reinforced concrete and composite supports were designed; an application program has been developed for the design of double-chain overhead lines, which makes it possible to simplify the initial choice of the minimum cross-section of the AC brand wire and the recommended support material, according to the values of the expected operating current, estimated service life and estimated cost of erecting one linear meter of the overhead line; an overview of the advantages of the introduction of composite supports has been carried out. Thus, during the overhaul of overhead lines, reconstruction of power transmission lines (transmission lines) with expired service life and during the construction of new electrical networks, it is advisable to use supports made of composite materials. **Practical significance:** the research results can be used in the design of double-chain overhead lines with a voltage of 110 kV.

Keywords: transmission line supports, composite supports, standard service life of supports, unified intermediate supports, fuzzy Mamdani output.

Введение

Техническое перевооружение генерирующих электростанций, распределительных сетей и преобразовательного оборудования является эффективным способом обеспечения бесперебойного питания потребителей электрической энергии всех категорий надежности. Опоры воздушных линий (ВЛ) электропередачи 110 кВ являются одним из наиболее важных элементов электрических сетей. Залогом успешной модернизации ВЛ является правильный выбор материала, из которого изготавливаются опоры. В связи с тем, что уже более тридцати лет не проводилось масштабной реконструкции и капитального ремонта энергосистемы Российской Федерации и других стран СНГ, износ электрооборудования, электрических сетей, а также опор ВЛ очень значителен и требует максимальной замены устаревших единиц оборудования на новые, соответствующие всем современным требованиям

[1–4]. Поэтому тема исследования, которая посвящена анализу свойств опор ВЛ 110 кВ, изготовленных из различных материалов, является актуальной и значимой.

Целью научного исследования является разработка рекомендаций по модернизации опор ВЛ. В качестве исследуемого объекта выбраны наиболее распространенные современные воздушные линии. В свою очередь, предметом исследования стали композитные опоры ВЛ.

В ходе проведения анализа научно-технической литературы в области исследования опор ВЛ 110 кВ рассмотрены нормативный срок службы, преимущества и недостатки четырех основных конструктивных типов опор: деревянных, железобетонных, металлических и композитных [5–18]. Результат проведенного анализа для каждого конструктивного типа опор представлен в табл. 1.

Таблица 1

Определение преимуществ и недостатков опор ВЛ 110 кВ,
изготовленных из различных материалов

Конструкции опор ВЛ	Нормативный срок службы	Достоинства	Недостатки
Деревянные опоры	30 лет	1) Малая стоимость 2) Простота и безопасность обслуживания 3) Использование экологичного возобновляемого материала 4) Простота утилизации	1) Неизбежное гниение древесины со временем 2) Рабочая зона опор насыщена вредными веществами 3) Требуется зимняя рубка 4) Необходима сушка бревен
Железобетонные опоры	40 лет	1) Длительный срок службы 2) Прочность 3) Пожаробезопасность	1) Большая масса 2) Сложность подвоза и установки
Металлические (стальные) опоры	50 лет	1) Большая долговечность 2) Надежность 3) Ремонтопригодность 4) Удобство эксплуатации	1) Требование специального покрытия (цинкование или покраска) 2) Высокая стоимость
Композитные опоры	65–80 лет	1) Малый вес опор 2) Упрощение хранения и транспортировки 3) Простота монтажа опор 4) Хорошие диэлектрические свойства 5) Экологичность	1) Высокая стоимость

На основании данных табл. 1 делаем вывод, что существенный ряд преимуществ делает композитные опоры более предпочтительными в сравнении с другими, более традиционными типами опор [19].

Проектирование двухцепных трасс ВЛ 110 кВ

Наиболее распространенными линиями электропередачи 110 кВ, в том числе в Оренбургской области, являются двухцепные ВЛ, возведенные на железобетонных опорах. В целях дальнейшего анализа принято решение спроектировать две трассы ВЛ: на железобетонных и композитных опорах (как наиболее современное и технологичное решение [20, 21]).

Ниже представлены исходные данные для проектирования двух двухцепных ВЛ напряжением 110 кВ, проходящих в ненаселенной местности Оренбургской области:

- 1) номинальное напряжение сети $U_n = 110$ кВ;
- 2) протяженность трассы $l = 38,823$ км;
- 3) активная нагрузка $P = 66$ МВт;
- 4) средневзвешенный коэффициент мощности $\text{tg}\varphi_{\text{ср.вз}} = 0,345$;
- 5) время, за которое потребитель, работая с максимальной нагрузкой, потребляет такое же количество электроэнергии, как и при работе по действительному графику в течение года $T_m = 5587,8$ ч;
- 6) район по ветру – III, район по гололеду – II;
- 7) $t_{\text{max}} = 42^\circ\text{C}$, $t_{\text{min}} = -43^\circ\text{C}$, $t_{\text{ср}} = 4^\circ\text{C}$;
- 8) степень загрязненности атмосферы – III.

Проектирование ВЛ состоит из двух частей: электрической и механической.

Ниже представлены три этапа электрической части проектирования воздушных ЛЭП:

- 1) выбор сечения проводов линий электропередачи по величине экономической плотности тока;
- 2) проверка провода по току наиболее тяжелого послеаварийного режима;
- 3) проверка провода по условиям короны.

В результате проведения расчета электрической части были выбраны:

- 1) неизолированный сталеалюминевый провод марки АС-185/43;
- 2) грозозащитный трос марки МЗ-9,2-В-ОЖ-Н-Р.

Ниже представлены пять этапов механической части проектирования воздушных ЛЭП:

- 1) определение физико-механических характеристик провода и троса;
- 2) выбор унифицированной опоры;
- 3) расчет проводов и троса на механическую прочность;
- 3.1) определение толщины стенки гололеда и величины скоростного напора ветра;
- 3.2) определение удельных нагрузок на провод и трос;
- 3.3) расчет критических пролетов;
- 3.4) расчет напряжений в проводе;
- 3.5) определение стрелы провеса проводов и троса;
- 3.6) определение напряжений в тросе;
- 4) выбор изоляторов и линейной арматуры;
- 5) расстановка опор по профилю трассы;
- 5.1) построение шаблона;
- 5.2) проверка опор на прочность.

В качестве унифицированных промежуточных опор были выбраны:

- 1) для трассы железобетонного варианта – ПБ110-8 (рис. 1).

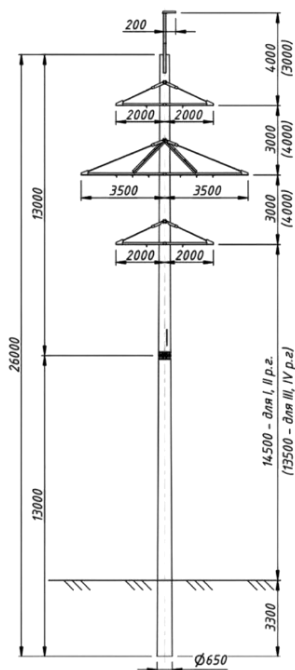


Рис. 1. Заводской чертеж железобетонной промежуточной двухцепной опоры для ВЛ 110 кВ марки ПБ110-8

2) для композитного варианта трассы – ПК110-2 (рис. 2):

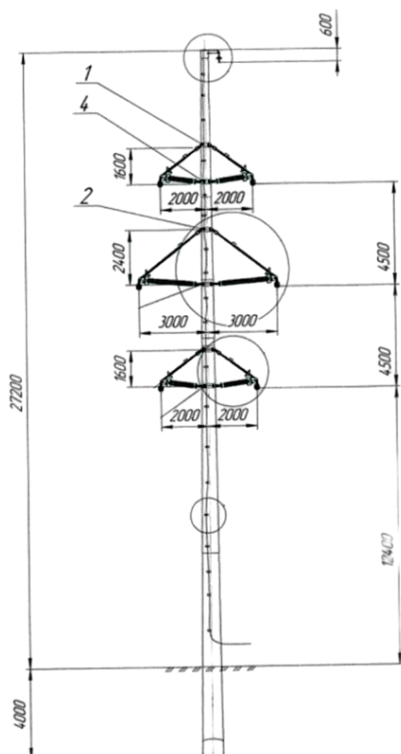


Рис. 2. Заводской чертеж композитной промежуточной двухцепной опоры для ВЛ 110 кВ марки ПК110-2

В результате проектирования трассы железобетонного варианта получили, что на одном анкерном участке, длиной примерно 1,6 км, необходимо возвести восемь промежуточных опор марки ПБ110-8. На рис. 3 изображена расстановка промежуточных железобетонных опор для одного анкерного участка.

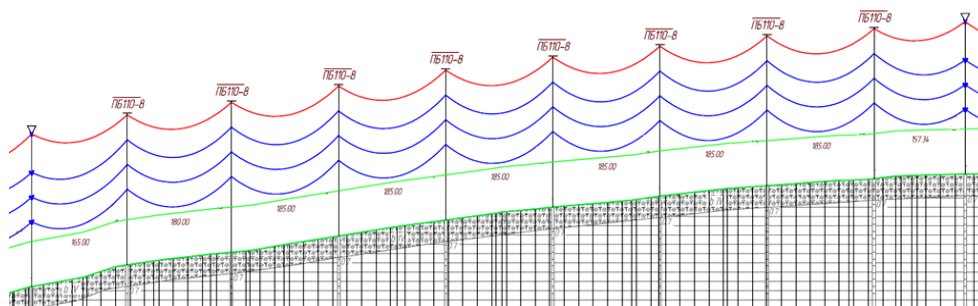


Рис. 3. Расстановка опор на одном анкерном участке железобетонной трассы

Отдельно отметим, что спроектированный вариант железобетонной трассы полностью совпадает с реально существующей ЛЭП 110 кВ, находящейся в Оренбургской области, а следовательно, выбранная методика расчета применима для практических расчетов.

При тех же исходных данных и с учетом технических особенностей композитных опор получили, что на том же анкерном участке потребуется возвести шесть промежуточных композитных опор марки ПК110-2. На рис. 4, для наглядного сравнения двух спроектированных вариантов, представлены и железобетонная, и композитная трассы. В паспортных данных опор ПБ110-8 и ПК110-2 определены габаритный, ветровой и весовой пролеты. По расчетам значения паспортных пролетов оказались больше рассчитанных (см. рис. 4) при одинаковых условиях окружающей среды. Величина стрелы провеса для обоих типов опор удовлетворяет требованиям ПУЭ, п. 2.4.56.

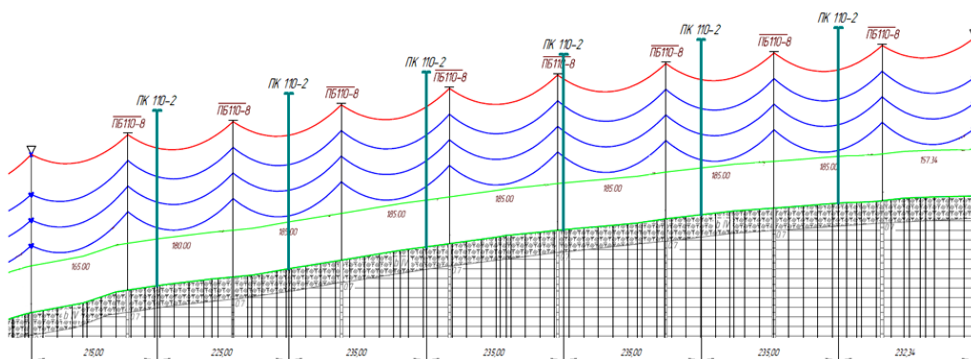


Рис. 4. Расстановка опор на одном анкерном участке двух вариантов

Спроектировав два варианта трассы ВЛ, можно сделать вывод, что при относительно ровной ненаселенной местности и при одинаковых условиях композитных опор потребуется меньше на 25 %, чем железобетонных.

Разработка прикладной программы для проектирования двухцепных трасс

В процессе исследования возникла необходимость в разработке прикладной программы для проектирования двухцепной трассы ВЛ 110 кВ, упрощающей выбор минимального сечения провода марки АС и рекомендуемого материала опор [22]. Алгоритм программы основан на нечетком выводе Мамдани [23].

При проектировании ВЛ 110 кВ используют провода марки АС с сечениями от 70 до 300 мм². Одним из основных критериев выбора сечения провода марки АС является проверка по длительному току нагрева наиболее тяжелого из послеаварийных режимов работы. Для двухцепной трассы ВЛ наиболее тяжелым послеаварийным режимом работы является выход из строя одной цепи резервированного участка.

Аварийный ток двухцепного участка сети определяется по формуле:

$$I_{ав} = 2 \cdot I_{раб}, \quad (1)$$

где 2 – число цепей линии электропередачи; $I_{раб}$ – расчетное значение рабочего тока участка сети.

Условие проверки по току наиболее тяжелого послеаварийного режима:

$$I_{доп} \geq I_{ав}, \quad (2)$$

где $I_{доп}$ – табличное значение допустимого по нагреву длительного тока нагрузки воздушной линии, определяется по паспортным данным ЛЭП.

В расчете ЛЭП с различными вариантами опор рассматриваются при одной температуре окружающей среды. Если принять температуру окружающей среды 30 градусов, то при этой температуре поправочный коэффициент принимается равным единице.

Отдельно стоит отметить, что в заводских паспортах опор жестко прописаны применяемые сечения проводов марки АС. К примеру, в паспорте промежуточной деревянной опоры ПД110-1 указаны три варианта сечения провода марки АС: АС-70, АС-95 и АС-120. В табл. 2 представлены рекомендации заводов-изготовителей опор по выбору сечения провода марки АС.

Таблица 2

Рекомендации завод изготовителей опор, для ВЛ 110 кВ

Материал опор	Провод марки АС
Деревянные	АС-70; АС-95; АС-120
Железобетонные	АС-70; АС-95; АС-120; АС-150; АС-185
Металлические	АС-70; АС-95; АС-120; АС-150; АС-185; АС-240
Композитные	АС-70; АС-95; АС-120; АС-150; АС-185; АС-240; АС-300

Прикладная программа написана в Microsoft Visual Studio на языке С#. Программа основана на принципах нечеткой логики, так как

входные переменные не имеют однозначной связи между собой. Использование нечетких множеств позволяет учитывать различные факторы. Программа состоит из трех входных переменных, базы правил и двух выходных переменных. На рис. 5 представлена структурная схема реализованной программы.

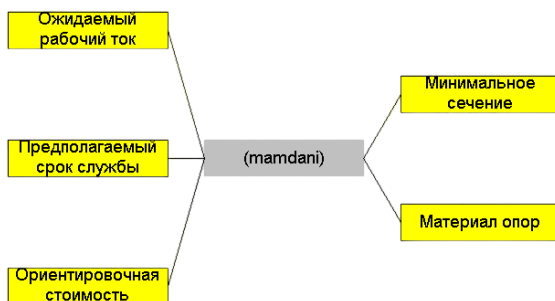


Рис. 5. Структура алгоритма выбора минимального сечения марки АС и материала опор ВЛ 110 кВ

Алгоритм работы программы следующий. Для каждого термина всех входных переменных создан и заполнен список с диапазоном значений с шагом 1. На вход подаются три переменные, и с помощью цикла определяется, к какому терму относится каждое введенное значение. Далее по базе правил определяются выходные переменные.

В качестве входных лингвистических переменных принимаются следующие значения:

1. Ожидаемый рабочий ток двухцепной трассы ВЛ 110 кВ в амперах. Терм-множество состоит из восьми термов: «Наименьший»; «Минимальный»; «Малый»; «Средний»; «Стандартный»; «Большой» и «Наибольший», параметры которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры лингвистической входной переменной
«Ожидаемый рабочий ток»

Терм	Тип функции	Параметры функции
Наименьший	Z-линейная	120 – 132,5
Минимальный	Трапециевидная	120 – 135 – 150 – 165
Малый	Трапециевидная	150 – 160 – 180 – 190
Средний	Трапециевидная	180 – 190 – 212,5 – 222,5
Стандартный	Трапециевидная	207,5 – 222,5 – 240 – 255
Большой	Трапециевидная	240 – 255 – 290 – 305
Максимальный	Трапециевидная	290 – 305 – 330 – 345
Наибольший	S-линейная	345 – 355

2. Предполагаемый срок службы (срок эксплуатации возводимой двухцепной трассы ВЛ 110 кВ) в годах. Терм-множество состоит из четырех термов: «Минимальный», «Средний»; «Длительный» и «Максимальный», параметры которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры лингвистической входной переменной
«Предполагаемый срок службы»

Терм	Тип функции	Параметры функции
Минимальный	Z-линейная	25 – 30
Средний	Трапецевидная	25 – 30 – 35 – 40
Длительный	Трапецевидная	35 – 40 – 45 – 50
Максимальный	Трапецевидная	45 – 50 – 75 – 80

3. Ориентировочная стоимость возведения одного погонного метра двухцепной трассы ВЛ в условных денежных единицах. Терм-множество состоит из четырех термов: «Минимальная», «Средняя», «Высокая» и «Максимальная», параметры которых приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры лингвистической входной переменной
«Ориентировочная стоимость»

Терм	Тип функции	Параметры функции
Минимальная	Z-линейная	1200 – 1300
Средняя	Трапецевидная	1200 – 1300 – 1600 – 1700
Высокая	Трапецевидная	1600 – 1700 – 2000 – 2100
Максимальная	S-линейная	2000 – 2100

В качестве выходных лингвистических переменных принимаются следующие значения:

1. «Минимальное сечение провода марки АС», показывает рекомендованное сечение провода двухцепной ВЛ 110 кВ по условию проверки по длительному току нагрева наиболее тяжелого из послеаварийных режимов работы. Задается следующими термами: «АС-70»; «АС-95»; «АС-120»; «АС-150»; «АС-185»; «АС-240»; «АС-300» и «Изменить $U_{ном}$ », параметры которых приведены в табл. 6.

2) «Рекомендуемый материал опор», показывает наиболее подходящий материал опор. Задается следующими термами: «Изменить срок или стоимость», «Деревянные», «Железобетонные»; «Металлические» и «Композитные», параметры которых приведены в табл. 7.

Для работы нечеткого вывода Мамдани необходимо задаться рядом правил. Функции принадлежности были заданы экспертно. Учитывая, что первая входная переменная имеет 8 термов, а вторая и третья – по 4 термина, база правил содержит 128 нечетких правил, примеры структуры которых приведены в табл. 8.

Таблица 6

Параметры лингвистической выходной переменной
«Минимальное сечение провода марки АС»

Терм	Тип функции	Параметры функции
АС-70	Трапецевидная	50 – 60 – 80 – 90
АС-95	Трапецевидная	75 – 85 – 105 – 115
АС-120	Трапецевидная	100 – 110 – 130 – 140
АС-150	Трапецевидная	129 – 140 – 160 – 171
АС-185	Трапецевидная	165 – 175 – 195 – 205
АС-240	Трапецевидная	220 – 230 – 250 – 260
АС-300	Трапецевидная	280 – 290 – 310 – 320
Изменить $U_{ном}$	Z-линейная	0 – 10

Таблица 7

Параметры лингвистической выходной переменной
«Рекомендуемый материал опор»

Терм	Тип функции	Параметры функции
Изменить срок или стоимость	Z-линейная	1,5 – 2
Деревянные	Трапецевидная	2 – 2,5 – 3,5 – 4
Железобетонные	Трапецевидная	4 – 4,5 – 5,5 – 6
Металлические	Трапецевидная	6 – 6,5 – 7,5 – 8
Композитные	S-линейная	8 – 8,5

Таблица 8

База правил для выбора минимального сечения провода
марки АС и материала опор двухцепной ВЛ 110 кВ

№ п/п	Ожидаемый рабочий ток	Срок службы	Стоимость	Минимальное сечение провода марки АС	Материал опор
1	Наименьший	Минимальный	Минимальная	АС-70	Деревянные
2	Наименьший	Средний	Средняя	АС-70	Железобетонные
3	Наименьший	Длительный	Высокая	АС-70	Металлические
4	Наименьший	Максимальный	Максимальная	АС-70	Композитные
5	Наименьший	Минимальный	Средняя	АС-70	Деревянные
...
128	Наибольший	Максимальный	Высокая	Изменить $U_{ном}$	Изменить срок или стоимость

На рис. 6 представлен пример работы реализованной программы. К примеру, при наименьшем ожидаемом рабочем токе, максимальном сроке службы и максимальной стоимости возведения одного погонного метра следует выбрать провод марки АС-70 и композитные опоры ВЛ 110 кВ.

Рис. 6. Пример работы программы «Выбор минимального сечения провода марки АС и материала опор двухцепной ВЛ 110 кВ»

Разработанная программа определения сечения провода марки АС и материала опор двухцепной ВЛ 110 кВ способна правильно определять минимальное сечение провода марки АС и рекомендуемый материал опор планируемой к строительству трассы ВЛ 110 кВ по ожидаемому рабочему току, планируемому сроку службы и ориентировочной стоимости одного погонного метра трассы.

Анализ преимуществ от внедрения композитных опор

В соответствии с табл. 1, у композитных опор не наблюдаются недостатки классических типов опор, такие как гниение, коррозия, растрескивание и т.п. [19].

Основным недостатком таких опор является высокая стоимость, обусловленная тем, что их производство пока развито недостаточно [24].

Произведем расчет ежегодных капитальных затрат на обновление одного погонного метра трассы [25], изготовленных из различных материалов по формуле:

$$К.З. = \frac{k_{\text{стоимость}}}{k_{\text{срокслужбы}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{стоимость}}$ – ориентировочная стоимость строительства одного погонного метра трассы ВЛ в условных денежных единицах; $k_{\text{сроку службы}}$ – срок эксплуатации возводимой трассы ВЛ в годах.

Таблица 9

Расчет ежегодных капитальных затрат

	Деревянные	Железобетонные	Металлические	Композитные
$k_{\text{стоимость}}, \text{ у.е.}$	1300	1700	2100	2500
$k_{\text{сроку службы}}, \text{ лет}$	30	40	50	80
К.З.	43,33	42,50	42,00	31,25

Анализируя полученные данные из табл. 9, можно однозначно заключить, что при проектировании трасс воздушных линий с максимальным сроком эксплуатации следует выбирать композитные опоры.

В Положении о технической политике ПАО «Россети» в разделе «Воздушные линии электропередачи» отмечается, что одной из основных задач электросетевого строительства является достижение максимальной компактности ВЛ. Для её решения, как нельзя лучше, подходит применение композитных опор. Но, к сожалению, на территории РФ они пока применяются крайне мало, так как создание специализированных заводов, ориентированных лишь на выпуск композитных опор ВЛ в настоящий момент нецелесообразно, тогда как выпуск на существующих мощностях по производству стеклопластиковых труб вполне рентабелен.

Заключение

В процессе проведенного исследования была разработана и зарегистрирована в УФЭР ОГУ прикладная программа для определения минимального сечения провода марки АС и рекомендуемого материала опор трассы ВЛ 110 кВ.

Выбор происходит, исходя из значений ожидаемого рабочего тока, планируемого срока службы и ориентировочной стоимости одного погонного метра трассы.

Сравнивая варианты спроектированных трасс ВЛ с железобетонными и композитными опорами, сделан вывод, что при относительно одинаковых условиях композитных опор трассы ВЛ потребуется меньше на 25 %, чем железобетонных.

Стоимость композитных опор ощутимо выше стоимости традиционных видов опор, поэтому, принимая решение об их использовании при строительстве новых или реконструкции действующих ВЛ, в каждом конкретном случае необходимо провести тщательный анализ экономической эффективности данного проекта. Если она будет доказана, то композитные опоры использовать рентабельнее, так как получение экономического эффекта ускорится за счет долговечности опор, удешевления их транспортировки и монтажа. Дальнейшим продолжением представленного исследования является разработка методики проектирования трасс ВЛ с композитными опорами, учитывающей показатели экономической эффективности.

Библиографический список

1. Уринсон Я.М., Кожуховский И.С., Сорокин И.С. Реформирование российской электроэнергетики: результаты и нерешенные вопросы // *Экономический журнал ВШЭ*. – 2020. – № 24 (3). – С. 323–339.
2. Рязанов М.А. Современное состояние и перспективы развития электроэнергетики в Кузбассе // *Научно-практические исследования*. – 2020. – № 4-3 (27). – С. 103–104.
3. Качура С.В. Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы развития // *Ученые записки Санкт-Петербург. им. В.Б. Бобкова филиала Рос. таможенной академии*. – 2007. – № 2 (28). – С. 432–457.
4. Корнюхова А.В. Состояние, проблемы и перспективы развития электроэнергетики России // *Вестник Рос. ун-та дружбы народов*. – 2013. – № 2. – С. 48–60.
5. Жмуренков Ю.С., Шаменок В.П., Кулик А.Ю. Опоры воздушных линий электропередач: назначение, виды, материалы // *Актуальные проблемы энергетики*. – 2017. – С. 129–132.
6. Попов Р.В., Савина Н.В., Сорокин И.С. Опоры воздушных линий в электрических сетях нового поколения // *Вестник Амурского гос. ун-та. Сер. Естественные и экономические науки*. – 2014. – № 67. – С. 112–115.
7. Динека Д.А. Способ технического обслуживания деревянных опор воздушных линий электропередачи // *Молодежь, наука, космос: сб. тр. студ. науч.-практ. конф., посв. Дню космонавтики*. – 2021. – С. 137–140.

8. Шергунова Н.А. Пропитанные деревянные опоры – идеальный материал для воздушных линий электропередачи // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2007. – № 2 (20). – С. 163–167.

9. Сабиткарамов М.И. Основные причины отказа железобетонных опор ЛЭП и их аварийности // Интеграция науки и образования: сб. ст. по материалам междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 75–77.

10. Соловьева А.И., Карпов А.Е. Композитные материалы, используемые в области восстановления несущей способности железобетонных опор линий электропередач // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5 (89). – С. 412–421.

11. Соловьева А.И., Георгиев С.В. К вопросу усиления и восстановления несущей способности железобетонных опор линий электропередач и столбов освещения // Строительство и архитектура – 2022: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Нальчик, 2022. – С. 142–145.

12. Сравнительный анализ железобетонных опор с композитными опорами ЛЭП / Б.Ж. Кожагелди, А.О. Жанпейсова, А.С. Кушумкулов, Ж.М. Абзалов // Вестник Казах. акад. транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2017. – № 1 (100). – С. 28–34.

13. Чушкина В.В. Оценка долговечности металлических конструкций опор линий электропередач // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы всерос. науч.-техн. конф., посв. 75-лет. заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. В.П. Селяева. – М., 2019. – С. 470–476.

14. Феоктистов А.А. Оценка технического состояния металлических опор воздушных линий электропередачи // Инновационные процессы в научной среде: материалы междунар. (заочной) науч.-практ. конф. – 2019. – С. 120–123.

15. Баширова Э.М., Феоктистов А.А. Повышение эксплуатационной надежности металлических опор воздушных линий электропередачи // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019): сб. трудов. – Тольятти, 2019. – С. 20–23.

16. Бочаров Ю.Н., Жук В.В. К вопросу о композитных опорах воздушных линий // Труды Кольского науч. центра РАН. – 2012. – № 1 (8). – С. 78–85.

17. Шпота А.А., Ремесник Д.В. Композитные опоры // Современные инновации. – 2015. – № 2 (2). – С. 37–40.

18. Research on composite material towers used in 110 kV overhead transmission lines / Han-ming Li, Shi-cong Deng, Qian-hu Wei, Yu-ning Wu, Qi-qi Xiang // International Conference on High Voltage Engineering and Application. – New Orleans, LA. – 2010. – P. 572–575.

19. Быковская Л.В., Штрамель А.В. Сравнительный анализ опор линий электропередачи // Инновационная наука. – 2022. – № 4–2. – С. 44–46.

20. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. – 2 изд. перераб. и доп. – Ленинград: Энергия, 1979.

21. Кожевников А.Н. Расчетно-экспериментальная оценка технического состояния опор воздушных линий электропередачи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. – Новосибирск, 2021. – 222 с.

22. Быковская Л.В., Штрамель А.В. Выбор материала опор воздушных линий 110 киловольт // Инновационная наука. – 2023. – № 4–2. – С. 26–30.

23. Семенова Н.Г., Влацкая Л.А. Исследование и моделирование электроэнергетических систем / ОГУ. – Оренбург, 2022. – 125 с.

24. Быковская Л.В., Штрамель А.В., Селин А.Ю. Преимущества и недостатки различных типов опор линий электропередачи // Инновационная наука. – 2023. – № 4–2. – С. 22–26.

25. Фурсанов М.И., Сазонов П.А. Анализ эффективности применения композитных опор в электрических сетях Республики Беларусь // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – № 1. – С. 15–23.

References

1. Urinson Ia.M., Kozhukhovskii I.S., Sorokin I.S. Reformirovanie rossiiskoi elektroenergetiki: rezul'taty i nereshennye voprosy [Reforming the Russian Electricity Industry: Results and Unresolved Issues]. *Ekonomicheskii zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki*, 2020, no. 24 (3), pp. 323-339.

2. Riazanov M.A. Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia elektroenergetiki v Kuzbasse [The current state and prospects for the development of the electric power industry in Kuzbass]. *Nauchno-prakticheskie issledovaniia*, 2020, no. 4-3 (27), pp. 103-104.

3. Kachura S.V. Elektroenergetika Rossii: sovremennoe sostoianie, problemy i perspektivy razvitiia [Russian electric power industry: current

state, problems and development prospects]. *Uchenye zapiski Sankt-Peterburgskogo imeni V.B. Bobkova filiala Rossiiskoi tamozhennoi akademii*, 2007, no. 2 (28), pp. 432-457.

4. Kornukhova A.V. Sostoianie, problemy i perspektivy razvitiia elektroenergetiki Rossii [Status, problems and prospects for the development of the electric power industry in Russia]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov*, 2013, no. 2, pp. 48-60.

5. Zhmurenkov Iu.S., Shamenok V.P., Kulik A.Iu. Opory vozdushnykh linii elektropredach: naznachenie, vidy, materialy [Supports of overhead power lines: purpose, types, materials]. *Aktual'nye problemy energetiki*, 2017, pp. 129-132.

6. Popov R.V., Savina N.V., Sorokin I.S. Opory vozdushnykh linii v elektricheskikh setiakh novogo pokoleniia [Supports of overhead lines in electric networks of a new generation]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye i ekonomicheskie nauki*, 2014, no. 67, pp. 112-115.

7. Dineka D.A. Sposob tekhnicheskogo obsluzhivaniia dereviannykh opor vozdushnykh linii elektropredachi [Method for maintenance of wooden poles of overhead power lines]. *Molodezh', nauka, kosmos. Sbornik trudov studentov nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi Dniu kosmonavtiki*, 2021, pp. 137-140.

8. Shergunova N.A. Propitannye dereviannye opory - ideal'nyi material dlia vozdushnykh linii elektropredachi [Impregnated wooden poles are the ideal material for overhead power lines]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2007, no. 2 (20), pp. 163-167.

9. Sabitkaramov M.I. Osnovnye prichiny otkaza zhelezobetonnykh opor LEP i ikh avariinosti [The main reasons for the failure of reinforced concrete supports of power transmission lines and their accident rate]. *Integratsiia nauki i obrazovaniia. Sbornik statei po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2017, pp. 75-77.

10. Solov'eva A.I., Karpov A.E. Kompozitnye materialy, ispol'zuemye v oblasti vosstanovleniia nesushchei sposobnosti zhelezobetonnykh opor linii elektropredach [Composite materials used in the field of restoration of the bearing capacity of reinforced concrete poles of power lines]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2022, no. 5 (89), pp. 412-421.

11. Solov'eva A.I., Georgiev S.V. K voprosu usileniia i vosstanovleniia nesushchei sposobnosti zhelezobetonnykh opor linii elektroperedach i stolbov osveshcheniia [On the issue of strengthening and restoring the bearing capacity of reinforced concrete poles of power lines and lighting poles]. *Stroitel'stvo i arkhitektura - 2022. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Nal'chik, 2022, pp. 142-145.

12. Kozhageldi B.Zh., Zhanpeisova A.O., Kushumkulov A.S., Abzalov Zh.M. Sravnitel'nyi analiz zhelezobetonnykh opor s kompozitnymi oporami LEP [Comparative analysis of reinforced concrete poles with composite poles for power transmission lines]. *Vestnik Kazakhskoi akademii transporta i kommunikatsii imeni M. Tynyshpaeva*, 2017, no. 1 (100), pp. 28-34.

13. Chushkina V.V. Otsenka dolgovechnosti metallicheskiikh konstruksii opor linii elektroperedach [Assessment of the durability of metal structures of power transmission line poles]. *Dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, izdelii i konstruksii. Materialy vs Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 75-letiiu zasluzhennogo deiatelia nauki Rossiiskoi Federatsii, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk, professora V.P. Seliaeva*. Moscow, 2019, pp. 470-476.

14. Feoktistov A.A. Otsenka tekhnicheskogo sostoianiia metallicheskiikh opor vozdushnykh linii elektroperedachi [Assessment of the technical condition of metal poles of overhead power lines]. *Innovatsionnye protsessy v nauchnoi srede. Materialy mezhdunarodnoi (zaochnoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2019, pp. 120-123.

15. Bashirova E.M., Feoktistov A.A. Povyshenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti metallicheskiikh opor vozdushnykh linii elektroperedachi [Improving the operational reliability of metal poles of overhead power lines]. *Energoeffektivnost' i energobezopasnost' proizvodstvennykh protsessov (EPPP-2019). Sbornik trudov*. Tol'iatti, 2019, pp. 20-23.

16. Bocharov Iu.N., Zhuk V.V. K voprosu o kompozitnykh oporakh vozdushnykh linii [To the question of composite supports of overhead lines]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, no. 1 (8), pp. 78-85.

17. Shpota A.A., Remesnik D.V. Kompozitnye opory [Composite supports]. *Sovremennye innovatsii*, 2015, no. 2 (2), pp. 37-40.

18. Li Han-ming, Deng Shi-cong, Wei Qian-hu, Wu Yu-ning, Xiang Qi-qi. Research on composite material towers used in 110 kV overhead

transmission lines. *International Conference on High Voltage Engineering and Application*. New Orleans, LA, 2010, pp. 572-575.

19. Bykovskaia L.V., Shtramel' A.V. Sravnitel'nyi analiz opor linii elektroperedachi [Comparative analysis of transmission line towers]. *Innovatsionnaia nauka*, 2022, no. 4-2, pp. 44-46.

20. Kriukov K.P., Novgorodtsev B.P. Konstruktsii i mekhanicheskii raschet linii elektroperedachi [Designs and mechanical calculation of power lines]. 2 nd ed. Leningrad: Energiia, 1979.

21. Kozhevnikov A.N. Raschetno-eksperimental'naiia otsenka tekhnicheskogo sostoianiia opor vozdushnykh linii elektroperedachi [Calculation and experimental assessment of the technical condition of overhead power transmission line supports]. Abstract of Ph. D. thesis. Novosibirsk, 2021, 222 p.

22. Bykovskaia L.V., Shtramel' A.V. Vybora materiala opor vozdushnykh linii 110 kilovol't [The choice of material for overhead line supports 110 kV]. *Innovatsionnaia nauka*, 2023, no. 4-2, pp. 26-30.

23. Semenova N.G., Vlatskaia L.A. Issledovanie i modelirovanie elektroenergeticheskikh sistem [Research and modeling of electric power systems]. Orenburg: Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, 2022, 125 p.

24. Bykovskaia L.V., Shtramel' A.V., Selin A.Iu. Preimushchestva i nedostatki razlichnykh tipov opor linii elektroperedachi [Advantages and disadvantages of different types of power transmission towers]. *Инновационная наука*, 2023, no. 4-2, pp. 22-26.

25. Fursanov M.I., Sazonov P.A. Analiz effektivnosti primeneniia kompozitnykh opor v elektricheskikh setiakh Respubliki Belarus' [Analysis of the effectiveness of the use of composite poles in the electrical networks of the Republic of Belarus]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2019, no. 1, pp. 15-23.

Сведения об авторах

Быковская Людмила Владимировна (Оренбург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод, электромеханика и электротехника» Института энергетики, электроники и связи Оренбургского государственного университета (460018, Оренбург, пр. Победы, 13, e-mail: biklud@yandex.ru).

Штрамель Артем Вадимович (Оренбург, Российская Федерация) – магистрант кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Оренбургского государственного университета (460018, Оренбург, пр. Победы, 13, e-mail: artem4804@gmail.com).

About the authors

Lyudmila V. Bykovskaya (Orenburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering of the Institute of Energy, Electronics and Communications of Orenburg State University (460018, Orenburg, 13, pr. Pobedi, e-mail: biklud@yandex.ru).

Artem V. Shtramel (Orenburg, Russian Federation) – Master's student of the Department of Electrical and Thermal Power Engineering of Orenburg State University (460018, Orenburg, 13, pr. Pobedi, e-mail: artem4804@gmail.com).

Поступила: 15.05.2023. Одобрена: 26.08.2023. Принята к публикации: 01.10.2023.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Быковская, Л.В. Исследование опор ВЛ 110 КВ, изготовленных из различных материалов / Л.В. Быковская, А.В. Штрамель // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 47. – С. 85–104. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.3.05

Please cite this article in English as:

Bykovskaya L.V., Shtramel A.V. Research of supports of VL 110 KV made from different materials. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 47, pp. 85-104. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.3.05