

Совершенствование конструктивной формы стальных узкобазых решетчатых опор воздушных линий электропередачи повышенной надежности

Антон Владимирович Танасогло¹, Игорь Михайлович Гаранжа¹,
Анатолий Николаевич Оржеховский², Милена Михайловна Писарева¹

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

² *Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА); г. Макеевка, ДНР, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие электрических сетей напрямую зависит от стоимости и надежности конструкций воздушных линий электропередачи (ВЛ), для чего необходимо, прежде всего, уточнение статических и динамических нагрузок и воздействий с целью оценки несущей способности при проектировании и эксплуатации; поиск, разработка и апробация новых оптимальных решений опор ВЛ, а также комплексный подход к проектированию сети как единой конструктивной системы на основе учета требований изготовления, монтажа и эксплуатации. Цель исследования — поиск оптимальной конструктивной формы стальных узкобазых башенных и порталных опор ВЛ напряжением 35 и 110 кВ.

Материалы и методы. При исследовании башенных одноствоечных и порталных опор ВЛ 35 и 110 кВ с диагоналями и распорками по массе учитывались нормальные, аварийные и монтажные режимы работы для анкерowanych участков с углами поворота воздушной линии от 0 до 60°. Линия рассматривалась как единая система. При изучении анкерно-угловых опор по массе учитывались возможные режимы работы: нормальные, аварийные и монтажные для различных углов поворота трассы линии.

Результаты. Разработан алгоритм определения напряжений для всех регламентируемых нормативными документами режимов работы токоведущих проводов и необходимого количества пролетов ВЛ. Впервые решена задача расчета напряженно-деформированного состояния ВЛ как единой системы с учетом совместной работы токоведущих проводов, грозотросов, гирлянд изоляторов, опор и фундаментов. На основе предложенного численного метода оптимизации дополнительно снижены показатели массы и стоимости узкобазых опор до 20 %.

Выводы. Предложенные узкобазые опоры технологичны в изготовлении, монтаже и эксплуатации. Портальные опоры с подкрепляющими диагоналями и без них рациональны в анкерно-угловых вариантах 110 кВ, особенно при больших нагрузках из плоскости и значительных перепадах рельефа местности, а также в промежуточных вариантах 110 кВ при высоте опор до 27 м. На ВЛ напряжением 35 кВ применение порталных свободностоящих опор дает положительный эффект только для промежуточных вариантов высотой до 20 м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздушная линия электропередачи, узкобазая опора, напряженно-деформированное состояние, расчетная модель, автоматизированный расчет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Оржеховский А.Н., Писарева М.М. Совершенствование конструктивной формы стальных узкобазых решетчатых опор воздушных линий электропередачи повышенной надежности // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 2. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.2

Автор, ответственный за переписку: Игорь Михайлович Гаранжа, garigo@mail.ru.

Structural form improvement of steel narrow-based lattice supports for high-reliability overhead lines

Anton V. Tanasoglo¹, Igor M. Garanzha¹, Anatoliy N. Orzhekhovskiy²,
Milena M. Pisareva¹

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

² *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture; Makeevka, DPR, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The development of electric networks directly depends on cost and reliability of overhead line structures, which requires, first of all, clarification of static and dynamic loads and impacts in order to assess the bearing capacity during

design and operation; search, development and testing of new optimal solutions for overhead line supports, as well as well as an integrated approach to network design as single structural system based on requirements for manufacturing, installation and operation. The purpose of work is to find the optimal structural form of steel narrow-base tower and portal supports for 35 and 110 kV overhead lines.

Materials and methods. When studying tower single and portal supports of 35 and 110 kV overhead power lines with diagonals and spacers by weight, normal, emergency and installation modes of operation were taken into account for anchored sections with overhead line rotation angles from 0 to 60°. The line was considered as single system. When studying anchor-angle supports by weight, possible operating modes were taken into account: normal, emergency and installation for different rotation angles of line route.

Results. Has been developed an algorithm for determining voltages for all operating modes of current-carrying wires and required number of overhead power line spans regulated by regulatory documents. For the first time has been solved the problem of calculating the stress-strain state for overhead power line as single system, taking into account the joint operation of current-carrying wires, ground wires, insulator strings, supports and foundations. Based on proposed numerical optimization method mass and cost of narrow-base supports have been further reduced by up to 20 %.

Conclusions. Proposed narrow-base supports are technologically advanced in manufacturing, installation and operation. Portal supports with and without reinforcing diagonals are rational in anchor-angle versions of 110 kV, especially with large loads from plane and significant differences in terrain, as well as in intermediate versions of 110 kV with support height of up to 27 m. On 35 kV overhead lines the use of portal free-standing supports gives a positive effect only for intermediate versions up to 20 m high.

KEYWORDS: overhead power line, narrow-base support, stress-strain state, design model, automated analysis

FOR CITATION: Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Orzhekhovskiy A.N., Pisareva M.M. Structural form improvement of steel narrow-based lattice supports for high-reliability overhead lines. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(2):2. URL: <http://inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.2.2

Corresponding author: Igor M. Garanzha, garigo@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом количество электроэнергии, передаваемой в электрических сетях высокого напряжения, возрастает. Это требует вовлечения огромных материальных и трудовых ресурсов не только в сфере энергетики, но и в других отраслях промышленности [1–3].

Развитие электрических сетей напрямую зависит от стоимости конструкций воздушных линий электропередачи (ВЛ). Поэтому следует реализовать все возможные пути снижения металлоемкости и повышения эффективности электросетевого строительства за счет совершенствования технических решений [2, 4, 5].

Для получения гарантии бесперебойной и эффективной работы воздушной линии как единой системы необходимо, прежде всего, уточнение статических и динамических нагрузок и воздействий с целью оценки несущей способности при проектировании и эксплуатации; поиск, разработка и апробация новых оптимальных решений опор ВЛ с использованием твердотельного моделирования; комплексный подход к проектированию сети как единой конструкционной системы на основе учета требований изготовления, монтажа и эксплуатации; реконструкция действующих высоковольтных линий электропередачи [6, 7].

До настоящего времени проектирование ВЛ сводилось в основном к изысканиям и расстановке типовых опор. Последние разработки новых унифицированных опор институт «Энергосетьпроект» закончил в 1980-х гг., и то в крайне ограниченном ассортименте. Вместе с тем, как показывает опыт, время действия унификации составляет порядка 20 лет, после чего принятые технические решения мораль-

но устаревают. Для преодоления этих проблем необходим пересмотр многих подходов и взглядов.

Цель исследования — поиск оптимальной конструктивной формы стальных узкобазых башенных и порталных опор воздушных линий электропередачи напряжением 35 и 110 кВ.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проанализировано напряженно-деформированное состояние (НДС) воздушной линии в виде целостной системы, где совместно работают все ключевые элементы — токоведущие провода, грозотросы, гирлянды изоляторов, опоры, фундаменты и грунтовое основание;

- разработаны новые оптимальные конструктивные формы стальных узкобазых опор повышенной надежности взамен железобетонных для воздушных линий по области определения;

- установлены рациональные области применения узкобазых башенных и порталных опор в качестве анкерно-угловых и промежуточных опор для воздушных линий напряжением 35 и 110 кВ.

Предметом исследования в данной работе приняты параметры НДС элементов стальных узкобазых решетчатых опор, конструктивное решение которых получено путем оптимизации типовых решений.

В качестве объекта исследования рассмотрены конструкции стальных одноствоечных узкобазых и порталных опор для ВЛ класса напряжения 35 и 110 кВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эксплуатационного состояния электросетевых конструкций выполнена статистическая

обработка информации по эксплуатации, авариям и отказам опор ВЛ и порталов открытых распределительных устройств (ОРУ) в энергосистемах РФ. Источником информации служили карты отказов ВЛ за 1991–2021 гг., содержащиеся в картотеке фирмы ОРГРЭС (г. Москва). Результаты статистического анализа отказов приведены на рис. 1.

Более половины отказов опор вызваны действием гололедно-ветровых нагрузок на провода, грозозащитные тросы и конструкции. Во многом это является следствием отсутствия достоверной информации о характере и величинах динамических нагрузок на элементы воздушных линий [8, 9].

Таким образом, создание новых решений опор ВЛ с узкой базой обусловлено необходимостью разработки рациональных по критерию стоимости

форм стальных башенных опор с повышенными показателями надежности (безотказности) взамен железобетонных в связи с периодическими авариями на электрических сетях.

Положительный многолетний опыт эксплуатации узкобазных опор на одноцепных ВЛ 35 кВ и двухцепных ВЛ 110 кВ на территории Республики Крым с характерными сложными условиями рельефа подтверждает потребность и обоснованность рассмотрения возможностей разработки типовой серии промежуточных и анкерно-угловых одноцепных и двухцепных узкобазных стальных опор для линий 35 и 110 кВ взамен применяющихся железобетонных унифицированных, плохо работающих на аварийные нагрузки и приведших к массовым авариям в 2009–2010 гг. [10–12].

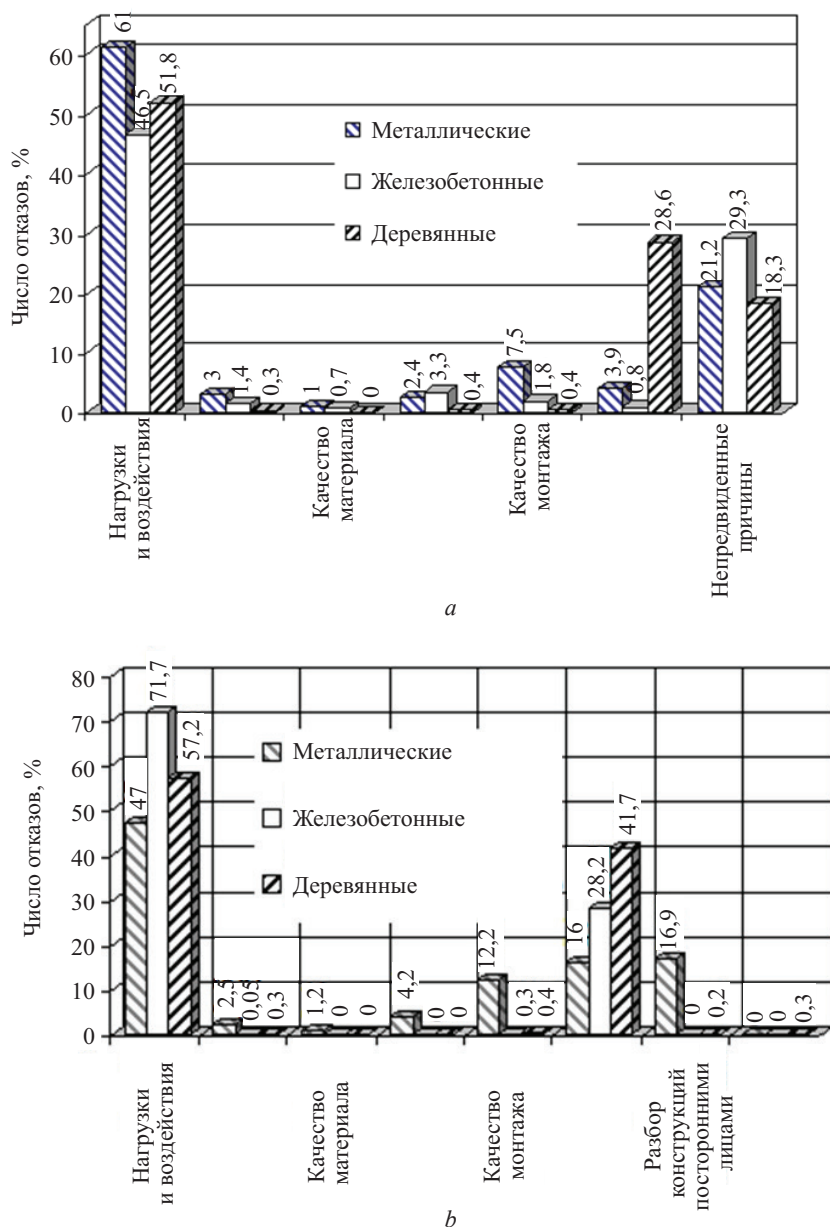


Рис. 1. Структура отказов опор ВЛ в РФ: а — за период 1991–2021 гг.; б — за период 2001–2021 гг.

В работе представлены результаты теоретического анализа возможности использования новых решений (типов) одноцепных и двухцепных опор для ВЛ напряжением 35 и 110 кВ. В процессе исследований рассмотрено шесть типов одностоечных опор башенного типа: П-35-1, АУ-35-1, П-35-2, АУ-35-2, П-110-1, АУ-110-1 и пять типов порталных опор: ПАУ-35-1, ПП-35-2, ПАУ-35-2, ПП-110-1, ПАУ-110-1. Схемы решетчатых одностоечных и порталных опор приведены на рис. 2, 3.

Исследованы одностольные башенные опоры постоянного квадратного поперечного сечения и двухстольные порталные опоры со стволами постоянного квадратного поперечного сечения с подкрепляющими диагоналями и распорками и без них. Анализ результатов расчетов подтвердил предположение о том, что появление дополнительных элементов в конструктивной системе опоры (в виде диагоналей и распорок) оправданно: значительно снижаются усилия от изгиба элементов порталной опоры.

При изучении башенных одностоечных и порталных опор с диагоналями и распорками по массе учитывались нормальные, аварийные и монтажные режимы работы для анкерных участков с углами поворота воздушной линии от 0 до 60°.

Ключевым требованием при создании новых решений опор ВЛ с учетом обеспечения надежности эксплуатации линии является строгое соблюдение не только ключевых технологических требований, а также аспектов проектирования и строительства.

При проектировании для исследуемых типов опор приняты следующие допущения: материал работает упруго; грозозащитные тросы крепятся к вершинам опор неподвижно, а гирлянды изоляторов, на которых подвешены токоведущие провода, отклоняясь, остаются прямолинейными; работа проводов и тросов при нахождении напряжений в них отождествляется с работой пологих нитей; при определении изгибных деформаций ствол опоры представляется как упруго заземленная консоль.

В аварийном режиме на опоры действует сосредоточенная сила, образовавшаяся при обрыве провода, и равномерно распределенная нагрузка от веса проводов и тросов. После загрузки системы в деформированном состоянии наступит, когда деформации проводов и тросов будут равны деформациям конструкций опор¹ [11, 13, 14].

Определение напряжений и несущая способность элементов опоры устанавливались в подсистеме расчета и оптимизации несущих металлоконструкций опор в составе единой сети [15–17].

Для определения нагрузок на анкерно-угловые опоры рассматривались нормальные и аварийные режимы работы ВЛ согласно гл. 2.5 ПУЭ 7. В расчетах принималось девять загрузений:

1) нормальный режим — провода и тросы не оборваны и свободны от гололеда; ветер направлен вдоль осей траверс слева направо;

¹ IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines (international standard). Geneva : IEC, 2022. 87 p.

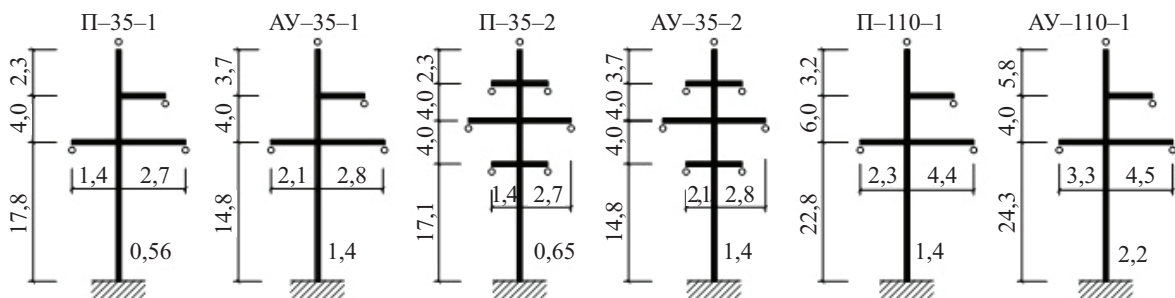


Рис. 2. Схемы стальных одностоечных опор ВЛ 35 и 110 кВ

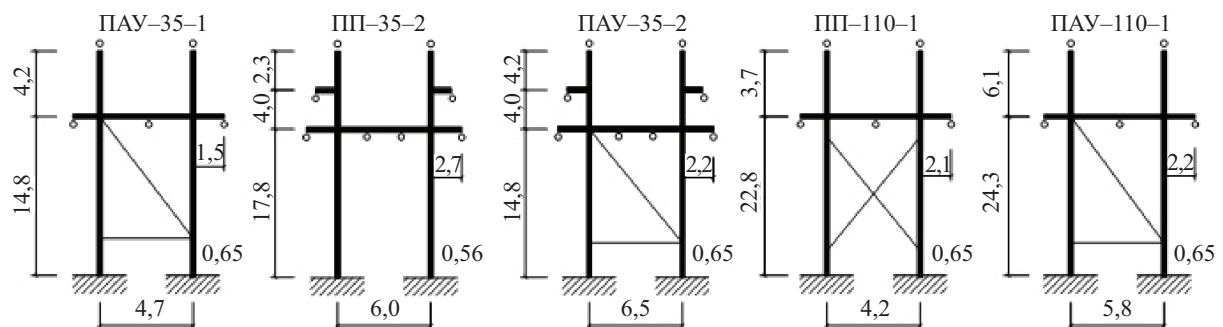


Рис. 3. Схемы стальных порталных опор ВЛ 35 и 110 кВ

2) нормальный режим — провода и тросы не оборваны и покрыты гололедом; ветер направлен вдоль осей траверс слева направо;

3) нормальный режим — опора концевая: провода и тросы не оборваны и свободны от гололеда; ветер направлен вдоль осей траверс слева направо;

4) аварийный режим — оборван провод в правой нижней фазе; гололед без ветра; тяжение слева направо;

5) аварийный режим — оборван провод в правой средней фазе; гололед без ветра; тяжение слева направо;

6) аварийный режим — оборван провод в правой верхней фазе; гололед без ветра; тяжение слева направо;

7) аварийный режим — опора концевая: оборван провод в правой нижней фазе; гололед без ветра;

8) аварийный режим — опора концевая: оборван провод в правой средней фазе; гололед без ветра;

9) аварийный режим — опора концевая: оборван провод в правой верхней фазе; гололед без ветра.

Расчетные режимы работы принимались для прямолинейных участков трассы ВЛ и при углах поворота линии до 60° с разностью тяжений в проводах и тросах в смежных пролетах.

Для определения нагрузок на промежуточные опоры также рассматривались нормальные и аварийные режимы. Опоры промежуточного типа рассчитывались при пяти загрузках согласно гл. 2.5 ПУЭ 7:

1) нормальный ветровой режим — ветер поперек ВЛ;

2) нормальный ветровой режим — ветер под углом 45° к ВЛ;

3) нормальный гололедный режим — ветер при гололеде;

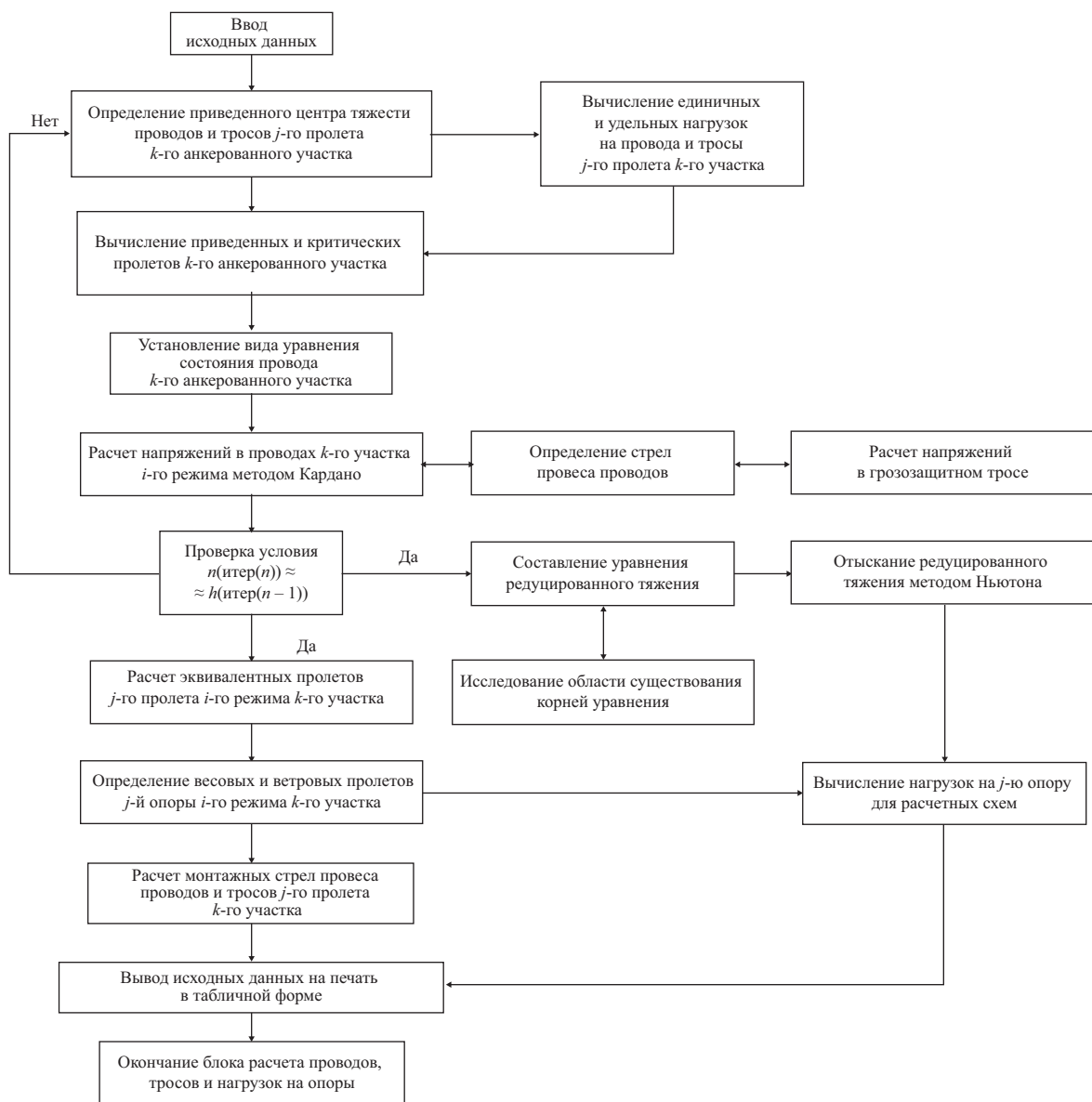


Рис. 4. Блок-схема определения параметров НДС для грозозащитных тросов, токоведущих проводов, а также нагрузок на конструкции опор

4) аварийный режим — обрыв провода одной фазы в габаритном пролете;

5) аварийный режим — обрыв троса в габаритном пролете.

Расчет опоры ВЛ с определением внутренних силовых факторов в элементах конструкции и подбором сечений с учетом нормативных ограничений и конструктивных требований выполнялся в программном комплексе, разработанном на кафедре металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ. В состав комплекса входят: подсистема расчета проводов, тросов и сбора нагрузок на опоры; подсистема расчета и оптимизации несущих металлоконструкций опор в составе единой сети; подсистема автоматизированного конструирования металлоконструкций опор ВЛ [10, 18, 19].

Блок-схема установления параметров НДС для грозозащитных тросов, токоведущих проводов, а также нагрузок на конструкции опор приведена на рис. 4.

В результате реализации алгоритма расчета проводов, грозотросов и нагрузок на решетчатую конструкцию получаем файл исходных данных для дальнейшего расчета узкобазой опоры башенного или порталного типа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Параметры конструкций высоковольтных линий электропередачи определяются большим числом разнообразных требований: соблюдение электрических габаритов между проводами, тросами и опорой, учет фактора унификации, ступенчатое изменение размеров сортамента проката [18, 20–22].

Задача оптимального проектирования ВЛ формулируется следующим образом: отыскать геометрические параметры сети с варьированием координат системы и топологии при заданных сечениях с минимизацией массы (1) при удовлетворении нормативных ограничений (2)–(4) и требований (5), (6).

Оптимизация геометрических параметров опоры с корректировкой типа решетки выполняется комбинаторным алгоритмом с применением метода направленного спуска.

Определение минимума целевой функции является существенно нелинейной дискретной задачей при установлении оптимальных геометрических параметров, так как велико число варьируемых параметров [23, 24]:

$$Z = f(H, L, b, Q, l_n, R_y, k_6, n_p), \quad (1)$$

где величины H, L, b, Q — заданные начальные параметры; H — высота узкобазой опоры; L — пролет анкерowanego участка; b — база опоры; Q — вектор внешней нагрузки; величины l_n, R_y, k_6, n_p — варьируемые параметры геометрической схемы; l_n — длина панели решетки; k_6 — количество болтов в узлах; n_p — тип решетки узкобазой опоры.

Запишем нормативные ограничения, которым удовлетворяет целевая функция массы (1):

- несущая способность сжатых и растянутых элементов соответственно:

$$\begin{aligned} N_i &\leq A_i \cdot R_{yi} \cdot \varphi_i, \\ N_i &\leq A_i \cdot R_{yi}, \end{aligned} \quad (2)$$

где N_i — продольное усилие в i -м элементе конструкции; R_{yi}, A_i, φ_i — соответственно расчетное сопротивление, площадь поперечного сечения и коэффициент устойчивости (продольного изгиба) каждого i -го элемента;

- условие по минимальной площади сечения элемента опоры:

$$A_i \geq [A_i], \quad (3)$$

где $[A_i]$ — минимально допустимая площадь i -го элемента по критериям предельной гибкости или конструктивным требованиям;

- величины неизвестных:

$$J_i \geq X_i \geq j_i, \quad (4)$$

где J_i и j_i — верхняя и нижняя границы изменчивости варьируемых параметров.

Основные условия, которым удовлетворяет вектор варьируемых параметров (1):

- условие равновесия:

$$k(x) \cdot \beta - P(x) = 0, \quad (5)$$

где $k(x)$ — матрица жесткости системы; β — вектор узловых перемещений; $P(x)$ — вектор внешних нагрузок;

- условие совместности деформаций:

$$\Delta L_{N_i}(N_i, A_i, l_i) = \Delta L_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z), \quad (6)$$

где ΔL_{N_i} и ΔL_i — деформация соответственно i -го и $i + 1$ элемента.

Алгоритм оптимального проектирования с подбором сечений элементов и определением массы опоры ВЛ приведен на рис. 5.

Вычисление вектора варьируемых параметров производится в следующей последовательности: выполняется статический расчет для нормальных, аварийных и монтажных режимов работы узкобазой опоры; для каждого режима определяются усилия и напряжения в элементах опоры; производится подбор сечений по расчетным усилиям и осуществляется проверка напряжений и гибкости элементов; производится перерасчет узкобазой опоры с учетом уточненных жесткостей элементов; подсчитывается масса отдельных элементов и всей конструкции в целом.

Результаты подбора сечений опоры-представителя, изображенной на рис. 6, приведены в табл. 1.

В качестве примера на рис. 6–9 представлены некоторые разработанные новые решетчатые анкерно-угловые и промежуточные одноствоечные и порталные опоры для линий электропередачи 35 и 110 кВ.

Всего исследовано одиннадцать опор: шесть одноствоечных опор башенного типа (П-35-1, АУ-35-1, П-35-2, АУ-35-2, П-110-1, АУ-110-1) и пять опор

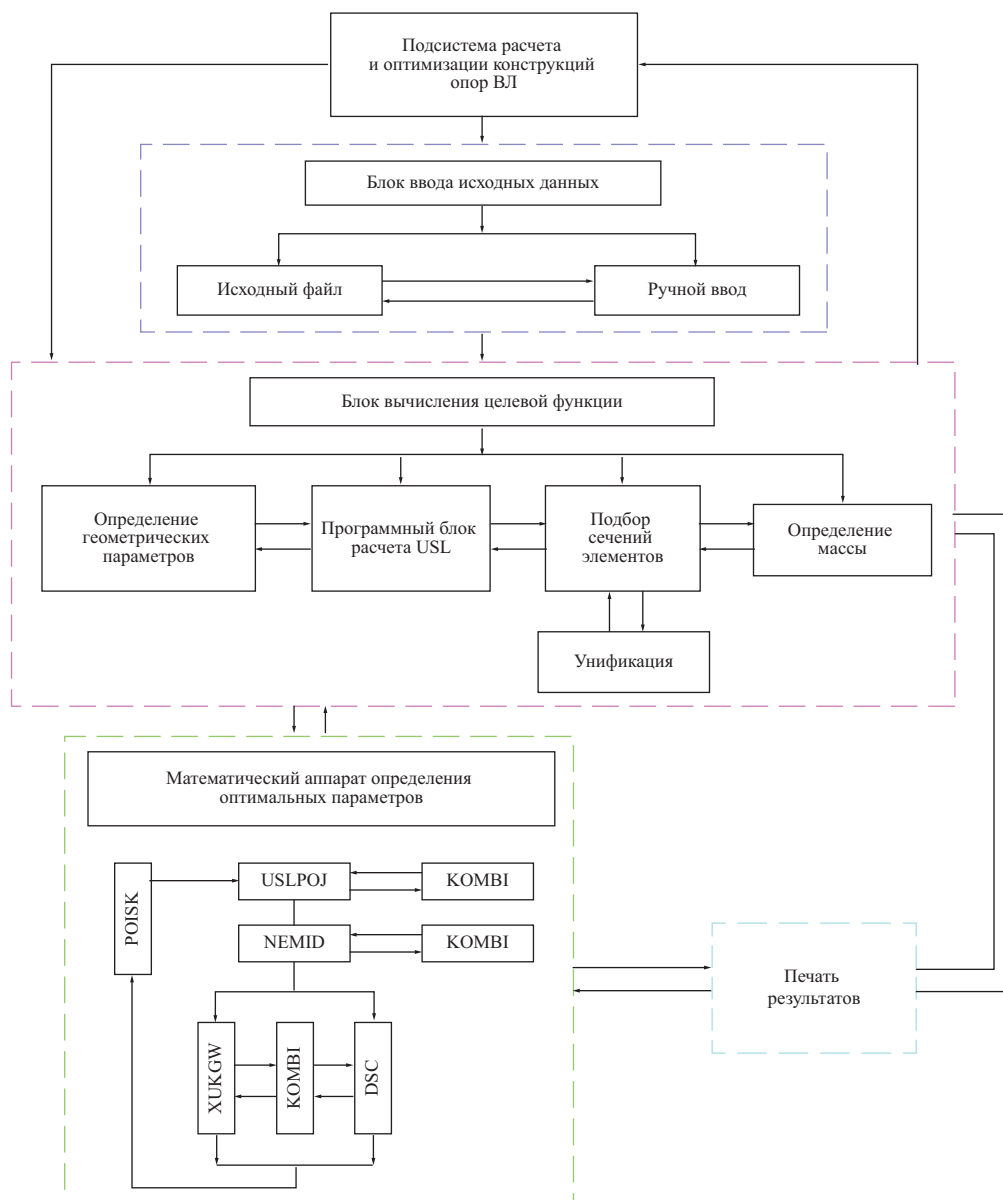


Рис. 5. Алгоритм расчета конструкции опоры с учетом оптимизации

Табл. 1. Подбор сечений элементов двухцепной опоры ВЛ 35 кВ типа П-35-2

Секция	Элемент	Усилие, т		Сечение, мм	Площадь, см ²	Гибкость	Напряжения, кг/см ²		Болты	
		сжатие	растяжение				σ	R_y	Количество	Класс прочности
Тросо-стойка	Пояс	2,26	2,30	L50 × 50 × 5	4,80	155	2379	2400	1М16	4,6
Ствол верхней части	Пояс	32,65	31,43	L100 × 100 × 7	13,75	37	2932	3350	6М20	5,8
	Раскос	3,41	1,97	L40 × 40 × 4	3,08	88	2181	2400	2М12	5,8
Ствол средней части	Пояс	83,34	81,61	L160 × 160 × 10	31,43	23	3107	3150	12М24	5,8
	Раскос	3,40	3,40	L40 × 40 × 4	3,08	82	2051	2400	2М12	5,8

Окончание табл. 1

Секция	Элемент	Усилие, т		Сечение, мм	Площадь, см ²	Гибкость	Напряжения, кг/см ²		Болты	
		сжатие	растяжение				σ	R_y	Количество	Класс прочности
Ствол нижней части	Пояс	98,08	96,24	$L200 \times 200 \times 12$	47,10	20	2440	3150	8М30	5,8
	Раскос	3,40	3,09	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	87	2166	2400	2М12	5,8
Траверса 1	Тяга	0,13	0,82	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	158	357	2400	1М12	5,8
	Пояс	0,87	0,21	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	93	632	2400	1М12	5,8
	Раскос	0,13	0,13	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	80	83	2400	1М12	5,8
Траверса 2	Тяга	0,0	1,09	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	158	829	2400	1М12	5,8
	Пояс	3,73	2,52	$L45 \times 45 \times 4$	3,48	88	2260	2400	2М12	5,8
	Раскос	0,82	0,61	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	102	659	2400	1М12	5,8
Диафрагмы	Раскос	2,17	2,17	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	101	1730	2400	1М12	5,8
	Распорка	3,00	3,00	$L40 \times 40 \times 4$	3,08	71	1728	2400	2М12	5,8
Консоли	Пояс	0,96	0,96	$L63 \times 63 \times 5$	6,13	120	1917	2400	1М12	4,6

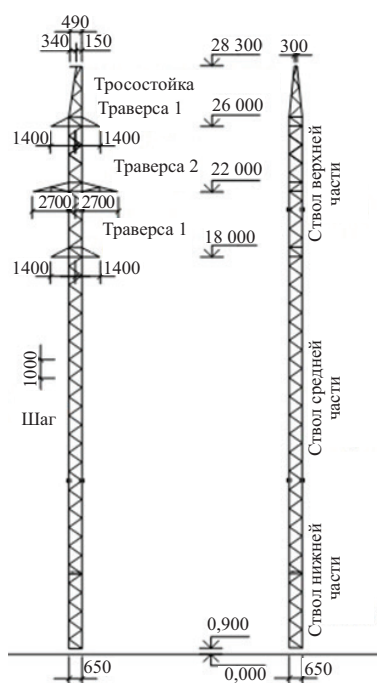


Рис. 6. Промежуточная башенная двухцепная опора ВЛ 35 кВ

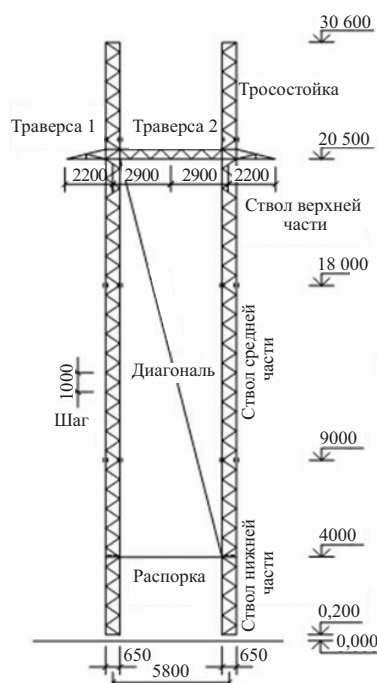


Рис. 7. Анкерно-угловая порталная одноцепная опора ВЛ 110 кВ

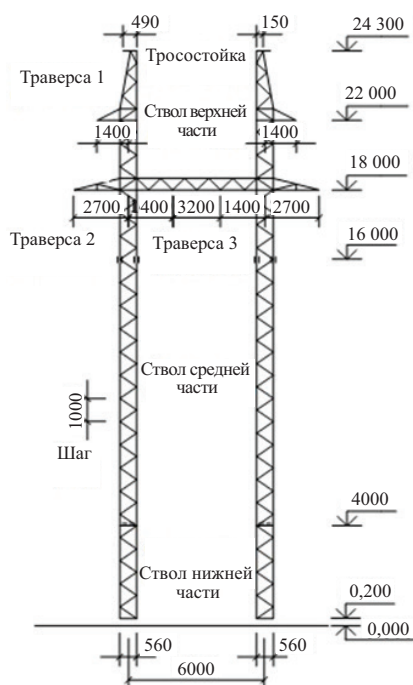


Рис. 8. Промежуточная порталная двухцепная опора ВЛ 35 кВ

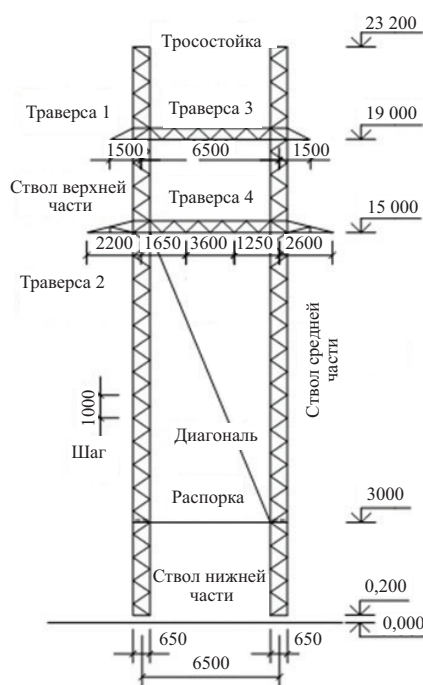


Рис. 9. Анкерно-угловая порталная двухцепная опора ВЛ 35 кВ

Табл. 2. Массы запроектированных одностоечных и порталных опор ВЛ 35 и 110 кВ

Тип опоры	Одностоечная опора			Портальная опора		
	Шифр	Высота, м	Масса, кг	Шифр	Высота, м	Масса, кг
Промежуточная одноцепная напряжением 35 кВ	П-35-1	24,1	1719	–	–	–
Анкерно-угловая одноцепная напряжением 35 кВ	АУ-35-1	22,5	3421	ПАУ-35-1	19,0	4115
Промежуточная двухцепная напряжением 35 кВ	П-35-2	27,4	3755	ПП-35-2	24,1	3932
Анкерно-угловая двухцепная напряжением 35 кВ	АУ-35-2	26,7	6193	ПАУ-35-2	23,0	6493
Промежуточная одноцепная напряжением 110 кВ	П-110-1	32,0	3879	ПП-110-1	26,5	3235
Анкерно-угловая одноцепная напряжением 110 кВ	АУ-110-1	34,1	8430	ПАУ-110-1	30,4	9376

портального типа (ПАУ-35-1, ПП-35-2, ПАУ-35-2, ПП-110-1, ПАУ-110-1).

Массы запроектированных башенных и порталных опор одноцепных и двухцепных опор ВЛ 35 и 110 кВ приведены в табл. 2. Массы опор определялись с учетом вспомогательных деталей и метизов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработаны оптимальные конструктивные формы узкобазых опор по области определения ВЛ 35 и 110 кВ. Запроектированные узкобазые опо-

ры соответствуют отечественным нормам проектирования, технологичны в изготовлении, монтаже и эксплуатации.

На основе предложенного численного метода оптимизации, при котором геометрические размеры и топология опор, а также параметры массы, трудоемкости и стоимости оптимизируются одновременно, дополнительно снижены показатели массы и стоимости узкобазых опор до 20 %.

По результатам проведенных исследований определены рациональные области применения оптимальных узкобазых опор порталного и башен-

ного типов. Портальные свободностоящие опоры с подкрепляющими диагоналями и без них рациональны в анкерно-угловых опорах напряжением 110 кВ, особенно при больших нагрузках из плоскости и значительных перепадах рельефа местно-

сти, а также в промежуточных опорах напряжением 110 кВ при высоте опор до 27 м. На воздушных линиях напряжением 35 кВ применение порталных свободностоящих опор дает положительный эффект только для промежуточных опор высотой до 20 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. Л. : Энергия, 1979. 312 с.
2. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. Atypical structural systems for mobile communication towers // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 052010. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052010
3. Шевченко Е.В. Анализ критериев устойчивости решетчатых башенных опор ВЛ // Вестник ДонНАСА. 2013. № 13 (4). С. 101–114.
4. Shapovalov S.N., Udod E.I. Increase of reliability and durability of electric grid structures. Kiev : Buildings, 2017. P. 434.
5. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Соловьев Д.В. Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 14–19. EDN VRJMYQ.
6. Назим Я.В. Особенности проектирования и расчета конструкций переходных опор ВЛ // Современное промышленное и гражданское строительство. 2019. № 11 (3). С. 38–49.
7. Миронов А.Н., Шевченко Е.В. Проблемы устойчивости стержней башенных решетчатых опор воздушных линий электропередачи // Вестник ДонНАСА. 2017. № 3 (113). С. 11–24.
8. Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Федорова С.Р. Мониторинг одноствоечных свободностоящих опор воздушных линий электропередачи при действии ветровых нагрузок // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 73–78. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-73-78. EDN ZSSEHX.
9. Сенькин Н.А., Филлимонов А.С. Взаимодействие конструктивных элементов в линейной цепи воздушной линии электропередачи // Жилищное строительство. 2024. № 1–2. С. 101–108. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-101-108. EDN SCMQKH.
10. Ефимов Е.Н., Тимашова Л.В., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110–750 кВ в 1997–2007 гг. // Энергия единой сети. 2012. № 5 (5). С. 32–41. EDN VXCBYN.
11. Shevchenko Ye., Nazim Ya., Tanasoglo A., Garanzha I. Refinement of Wind Loads on Lattice Support Structures of the Intersystem Overhead Power Transmission Lines 750kV // Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. Pp. 1028–1035. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.225
12. Khawaja A.H., Huang Q., Khan Z.H. Monitoring of Overhead Transmission Lines : a Review from the Perspective of Contactless Technologies // Sensing and Imaging. 2017. Vol. 18. Issue 1. DOI: 10.1007/s11220-017-0172-9
13. Ohsaki M. Optimization of Finite Dimensional Structures. Tokyo : CRC Press Taylor & Francis Group, 2019. 221 p.
14. A.S.C.E Design of Latticed Steel Transmission Structures. New York : A.S.C.E, 2021. 98 p.
15. Bazant Z.P., Cedolin L. Stability of structures. New York : Oxford University Press, 2010. 1011 p. DOI: 10.1142/9789814317047
16. Coskun S.B. Advances in computational stability analysis. Rijeka : InTech, 2018. 132 p.
17. Winterstetter T., Schmidt H. Stability of circular cylindrical steel shells under combined loading // Thin-Walled Structures. 2002. Vol. 40. Issue 10. Pp. 893–910. DOI: 10.1016/S0263-8231(02)00006-X
18. Yoo C.H., Lee S.C. Stability of structures — principles and applications. New York : Elsevier Academic Press, 2017. 529 p.
19. Yang B. Stress, strain, and structural dynamics : an interactive handbook of formulas, solutions, and MATLAB Toolboxes. Cambridge : Elsevier Academic Press, 2020. 314 p.
20. Горохов Е.В., Васылев В.Н. Силовые испытания устойчивости фрагментов опор ВЛ 330кВ // Современное промышленное и гражданское строительство. 2019. Т. 15. № 3. С. 53–62.
21. Назим Я.В., Горохов Е.В. Оптимизация решетки опор ВЛ по критерию устойчивости стержней // Металлические конструкции. 2017. № 21 (2). С. 20–36.
22. Саливон Ю.И., Бакаев С.Н. Алгоритм мониторинга технического состояния решетчатых опор высоковольтных линий электропередачи // Металлические конструкции. 2018. № 18 (2). С. 135–149.
23. Kondrateva O.E., Voronkova E.M., Loktionov O.A. Impact assessment of weather and climate events on overhead transmission lines reliability with voltages up to 110–220 kV // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388054
24. Сенькин Н.А. Учет прогрессирующего обрушения при проектировании опор воздушных линий электропередачи // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4 (93). С. 37–46. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46. EDN MXCQXB.

Поступила в редакцию 2 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 15 октября 2024 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Антон Владимирович Танасогло** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1213498, Scopus: 56826221800, ResearcherID: JFA-6248-2023, ORCID: 0000-0002-1825-2738; a.v.tan@mail.ru;

Игорь Михайлович Гаранжа — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 564746, Scopus: 56437725200, ResearcherID: AAD-8595-2022, ORCID: 0000-0002-6687-7249; garigo@mail.ru;

Анатолий Николаевич Оржеховский — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной механики; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 86123, г. Макеевка, ДНР, ул. Державина, д. 22; РИНЦ ID: 968202, Scopus: 57214804876, ResearcherID: AAP-3799-2021, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Милена Михайловна Писарева — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; milena.pisareva.02@bk.ru.

Вклад авторов:

Танасогло А.В. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Гаранжа И.М. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Оржеховский А.Н. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Писарева М.М. — концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Every year the amount of electricity transmitted in high-voltage electrical networks increases. This requires the involvement of huge material and labour resources not only in the energy sector, but also in other industries [1–3].

The development of electrical networks directly depends on the cost of overhead transmission line (OHPL) structures. Therefore, all possible ways to reduce the metal intensity and increase the efficiency of power grid construction by improving technical solutions should be implemented [2, 4, 5].

To obtain a guarantee of uninterrupted and efficient operation of an overhead line as a unified system it is necessary, first of all, to specify static and dynamic loads and impacts in order to assess the bearing capacity at design and operation; search, development and testing of new optimal solutions of overhead line supports using solid-state modelling; integrated approach to the design of the network as a unified structural system on the basis of taking into account the requirements of manufacturing, installation and operation; reconstruction of the existing high voltage transmission lines; and reconstruction of the existing high voltage transmission lines.

Up to now, overhead line design has been reduced mainly to the survey and arrangement of standard sup-

ports. The last developments of new unified supports were completed by the Institute “Energosetproekt” in the 1980s, and then in an extremely limited assortment. At the same time, as experience shows, the validity period of unification is about 20 years, after which the adopted technical solutions become obsolete. To overcome these problems, it is necessary to revise many approaches and views.

The aim of the research is to search for the optimal structural form of steel narrow-base tower and portal supports of 35 and 110 kV overhead power lines.

To achieve the set goal the following tasks have been solved:

- the stress-strain state (SSS) of an overhead line as an integral system was analyzed, where all key elements — current-carrying wires, lightning rods, insulator garlands, supports, foundations and ground base — work together;
- new optimal structural forms of steel narrow-base supports of increased reliability instead of reinforced concrete ones for overhead lines in the area of definition have been developed;
- rational areas of application of narrow-base tower and portal supports as anchor-corner and intermediate supports for overhead lines of 35 and 110 kV have been established.

The subject of research in this work are the VAT parameters of steel narrow-base lattice supports elements,

the structural solution of which is obtained by optimization of typical solutions.

As an object of the research the designs of steel single-unit narrow-base and portal supports for overhead lines of 35 and 110 kV voltage class are considered.

MATERIALS AND METHODS

Statistical processing of information on operation, accidents and failures of overhead line supports and portals of open switchgears (SWYD) in power systems of the Russian Federation was performed to assess the operational condition of power grid structures. The source of information were the maps of overhead

line failures for 1991–2021 contained in the card file of ORGRES (Moscow). The results of statistical analysis of failures are shown in Fig. 1.

More than a half of pylon failures are caused by the action of ice and wind loads on wires, lightning protection cables and structures. In many respects, this is a consequence of the lack of reliable information on the nature and magnitudes of dynamic loads on the elements of overhead lines [8, 9].

Thus, the creation of new solutions of overhead line supports with a narrow base is caused by the need to develop rational by cost criterion forms of steel tower supports with increased reliability (failure-free) indica-

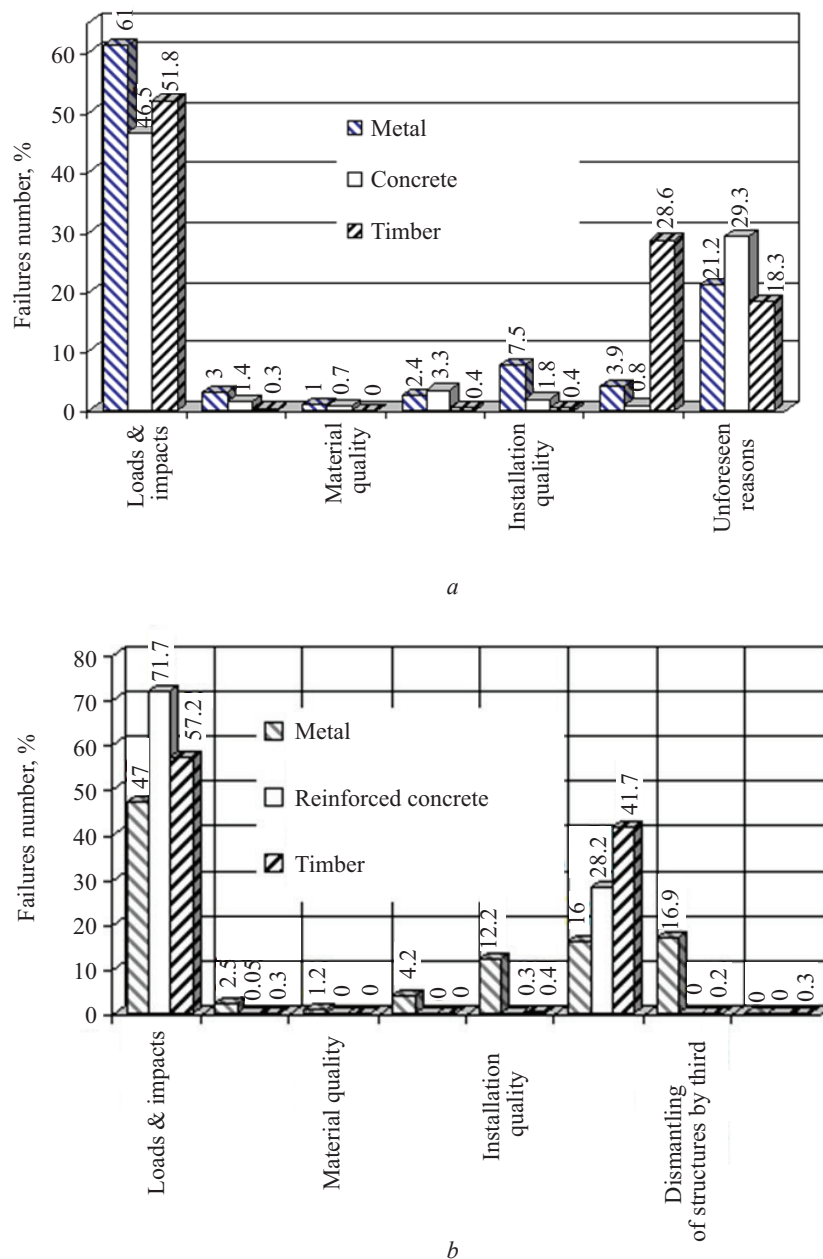


Fig. 1. Structure of failures of overhead transmission line towers in the Russian Federation: *a* — for the period 1991–2021; *b* — for the period 2001–2021

tors instead of reinforced concrete ones due to periodic accidents on power grids.

Positive long-term experience of operation of narrow-base supports on single-circuit 35 kV overhead lines and double-circuit 110 kV overhead lines on the territory of the Republic of Crimea with characteristic difficult terrain conditions confirms the need and validity of considering the possibilities of developing a standard series of intermediate and anchor-corner single-circuit and double-circuit narrow-base steel supports for 35 and 110 kV lines instead of the used reinforced concrete unified ones, which do not work well under emergency loads and led to mass accidents in 2009–2010 [10–12].

The paper presents the results of theoretical analysis of the possibility of using new solutions (types) of single and double-circuit supports for 35 and 110 kV overhead power lines. In the process of research six types of single-cell tower-type supports were considered: P-35-1, AU-35-1, P-35-2, AU-35-2, P-110-1, AU-110-1 and five types of portal supports: PAU-35-1, PP-35-2, PAU-35-2, PP-110-1, PAU-110-1. Schemes of lattice single column and portal supports are shown in Fig. 2, 3.

Single-barrel tower supports of constant square cross-section and double-barrel gantry supports with constant square cross-section shafts with and without reinforcing diagonals and struts were investigated. The analysis of the calculation results confirmed the assumption that the appearance of additional elements in the structural system of the support (in the form of diago-

nals and struts) is justified: the bending forces of the portal support elements are significantly reduced.

When studying tower single column and gantry supports with diagonals and struts by weight, normal, emergency and installation modes of operation were taken into account for anchored sections with overhead line rotation angles from 0 to 60°.

The key requirement for creating new solutions of overhead line supports with regard to ensuring the reliability of line operation is strict compliance not only with the key technological requirements, but also with the aspects of design and construction.

The following assumptions are made when designing for the investigated types of supports: the material works elastically; lightning protection ropes are fixed to the tops of the supports, and the insulator garlands, on which the current-carrying wires are suspended, deflecting, remain straight; the work of wires and ropes when finding the stresses in them is identified with the work of hollow threads; when determining the bending deformations the trunk of the support is represented as an elastically pinched cantilever.

In the emergency mode, the supports are subjected to a concentrated force generated by the wire breakage and a uniformly distributed load from the weight of wires and cables. After loading, the equilibrium of the system in the deformed state will occur when

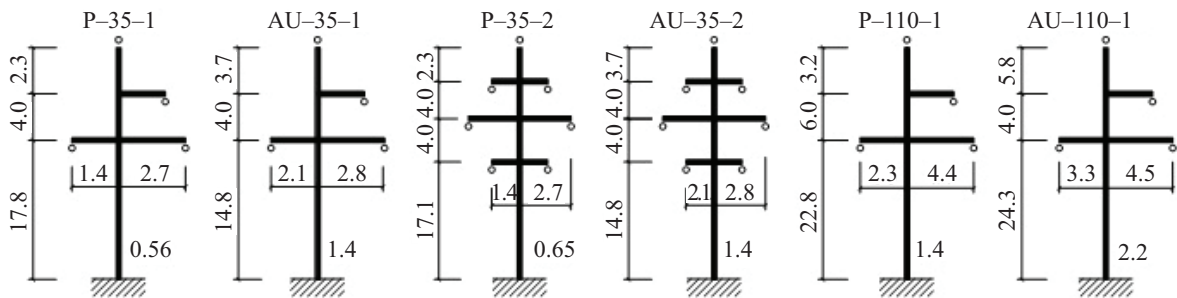


Fig. 2. Schemes of steel single column supports of 35 and 110 kV overhead power lines

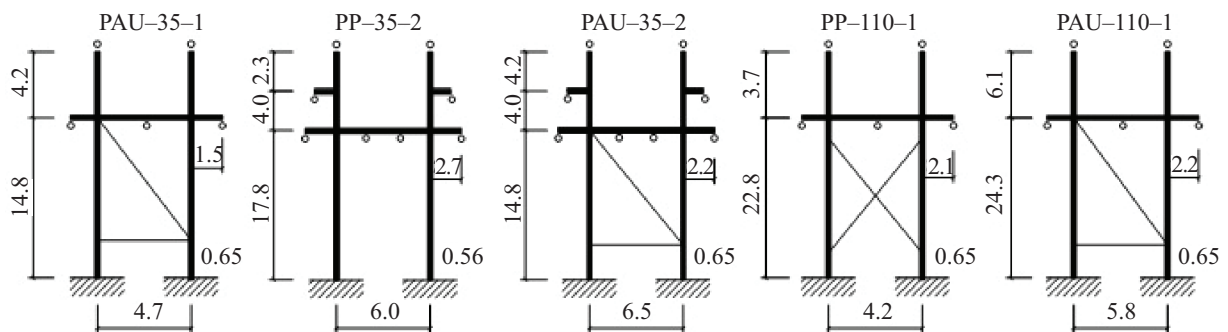


Fig. 3. Schemes of steel portal supports of 35 and 110 kV overhead power lines

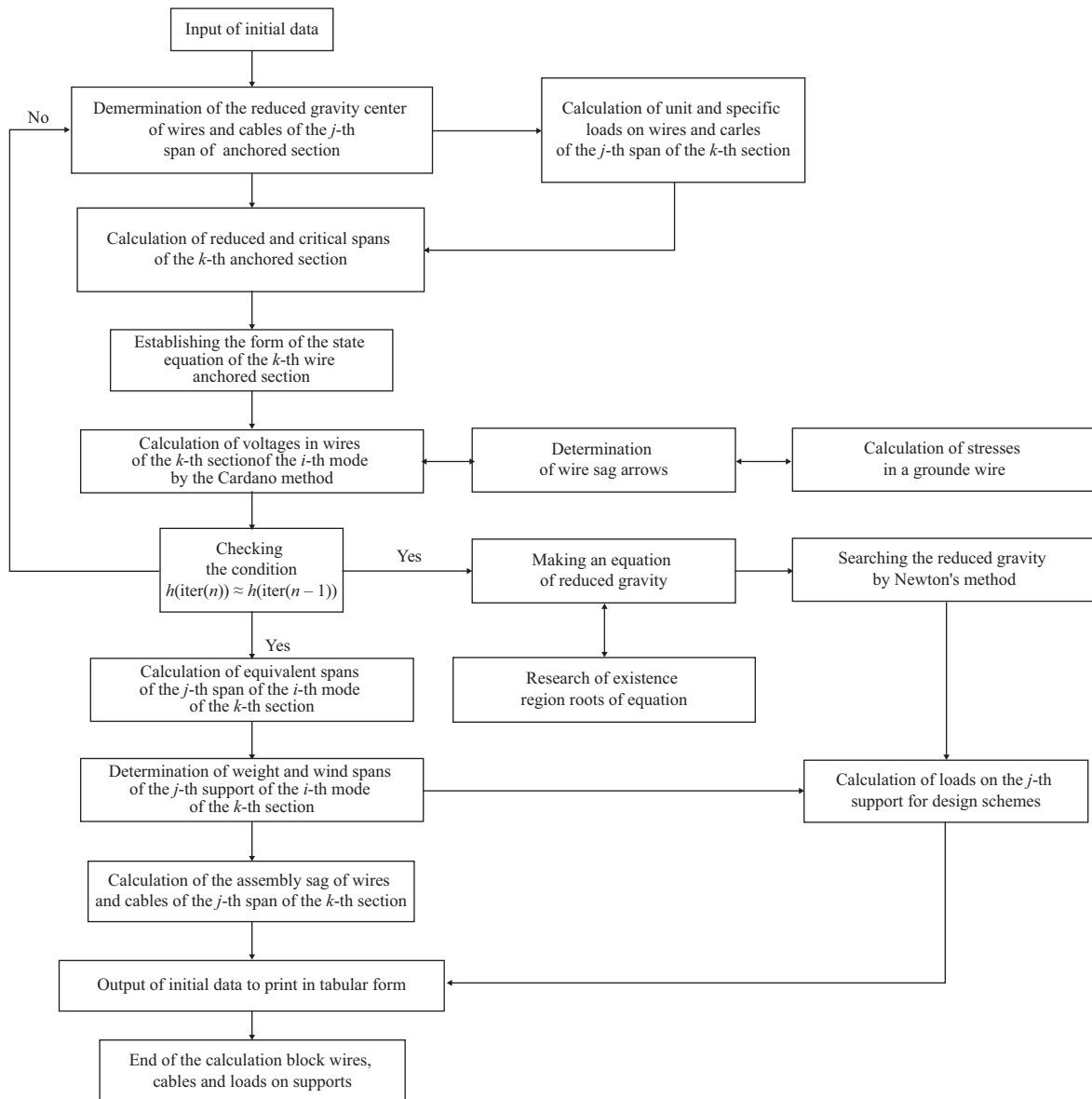


Fig. 4. Block diagram of determining the VAT parameters for lightning protection cables, current-carrying wires, as well as loads on the support structures

the deformations of wires and cables are equal to the deformations of the support structures¹ [11, 13, 14].

The determination of stresses and load-bearing capacity of the support elements were established in the subsystem for calculation and optimization of load-bearing metal structures of supports as part of the unified network [15–17].

To determine the loads on the anchor-corner supports, normal and emergency modes of overhead line operation were considered according to Ch. 2.5 of PUE 7. In the calculations nine loads were accepted:

1) normal mode — wires and cables are not broken and free from ice; wind is directed along the axes of traverses from left to right;

2) normal mode — wires and cables are not broken and are covered with ice; wind is directed along the traverse axes from left to right;

3) normal mode — end support: wires and cables are not broken and free of ice; wind is directed along the traverse axes from left to right;

4) emergency mode — broken wire in the lower right phase; ice without wind; pulling from left to right;

5) emergency mode — broken wire in the right middle phase; ice without wind; pulling from left to right;

6) emergency mode — broken wire in the right upper phase; ice without wind; pulling from left to right;

7) emergency mode — end support: broken wire in the lower right phase; ice without wind; pulling from left to right;

8) emergency mode — end support: broken wire in the right middle phase; ice without wind;

¹ IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines (international standard). Geneva, IEC, 2022; 87.

9) emergency mode — end support: broken wire in the right upper phase; ice without wind.

Calculated operating modes were accepted for straight sections of the overhead line route and at line rotation angles up to 60° with the difference of pulls in wires and cables in adjacent spans.

To determine the loads on intermediate supports, normal and emergency modes were also considered. Intermediate supports were calculated under five loads according to Ch. 2.5 of PUE 7:

- 1) normal wind conditions — wind across the overhead line;
- 2) normal wind conditions — wind at an angle of 45° to the overhead line;
- 3) normal icing mode — wind at icing;
- 4) emergency mode — wire breakage of one phase in the overall span;

5) emergency mode — cable breakage in the overall span.

The calculation of the overhead line support with determination of internal force factors in the structural elements and selection of cross-sections taking into account the regulatory restrictions and design requirements was performed in the software package developed at the Department of Metal and Wooden Structures of the National Research University of Moscow State University. The complex includes: a subsystem for calculation of wires, cables and collection of loads on supports; a subsystem for calculation and optimization of bearing metal structures of supports as part of a single network; subsystem for automated design of metal structures of overhead line supports [10, 18, 19].

The block diagram of establishing the VAT parameters for lightning protection cables, current-carrying

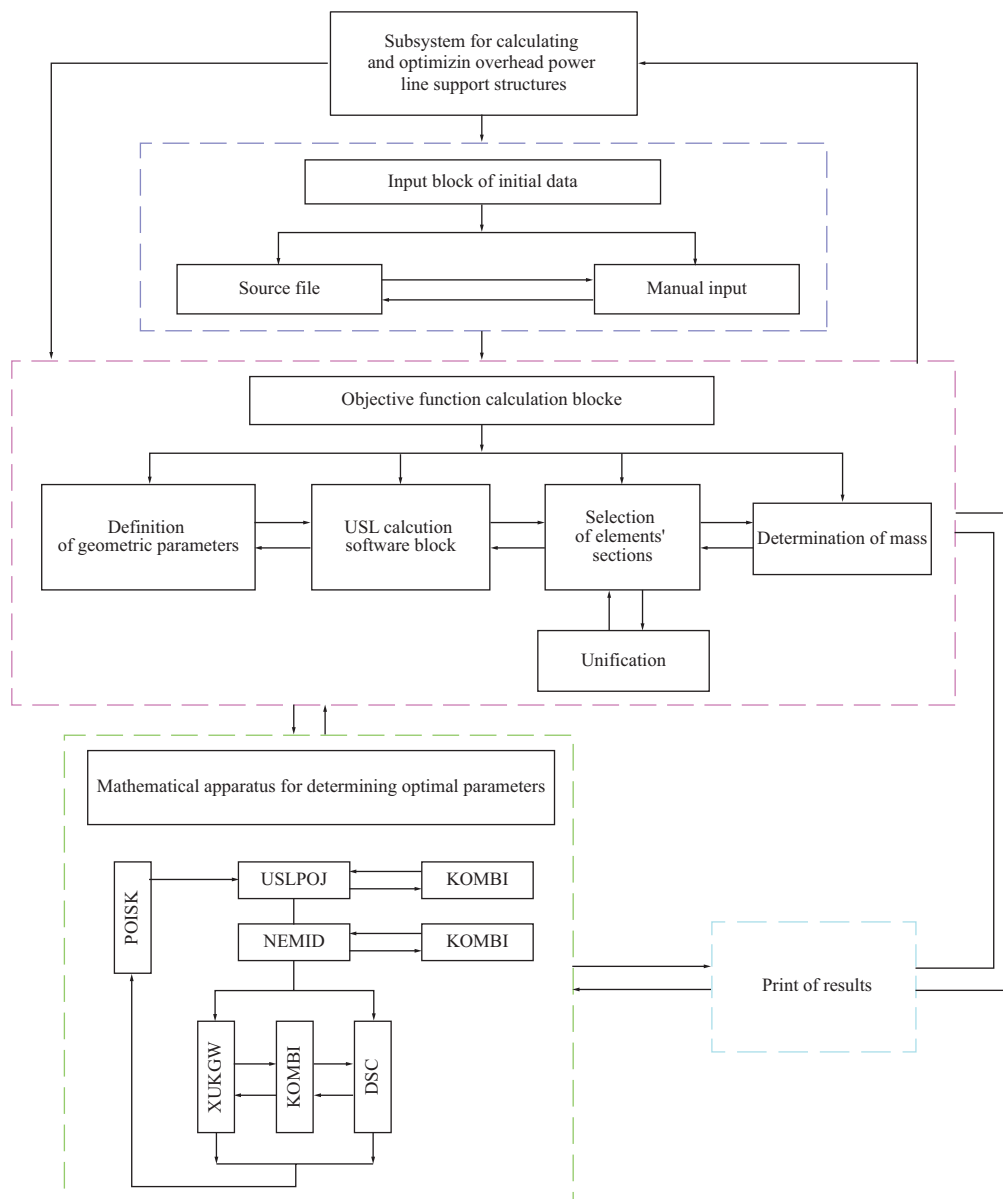


Fig. 5. Algorithm for calculating the design of the support taking into account optimization

conductors, as well as loads on the support structures is shown in Fig. 4.

As a result of realization of the algorithm of calculation of conductors, lightning ropes and loads on the lattice structure we get a file of initial data for further calculation of narrow-base tower or portal type support.

RESEARCH RESULTS

Parameters of structures of high-voltage power lines are determined by a large number of various requirements: observance of electrical dimensions between wires, cables and supports, taking into account the factor of unification, staggered change of sizes of rolled product assortment [18, 20–22].

The problem of optimal overhead line design is formulated as follows: to find geometrical parameters of the network with varying system coordinates and topology at given cross-sections with minimization of mass (1) while satisfying normative constraints (2)–(4) and requirements (5), (6).

Optimization of the geometrical parameters of the support with correction of the lattice type is performed by a combinatorial algorithm using the method of directed descent.

Determination of the minimum of the target function is an essentially nonlinear discrete problem in establishing the optimal geometric parameters, since the number of varying parameters is large [23, 24]:

$$Z = f(H, L, b, Q, l_p, R_y, k_b, n_r), \quad (1)$$

where H, L, b, Q are the given initial parameters; H is the height of the narrow-base support; L is the span of the anchored section; b is the base of the support; Q is the vector of external load; l_p, R_y, k_b, n_r are the varying parameters of the geometrical scheme; l_p is the length of the lattice panel; k_b is the number of bolts in the nodes; n_r is the type of the narrow-base support lattice.

Let us write down the normative constraints satisfied by the target mass function (1):

- bearing capacity of compressed and tensile elements, respectively:

$$N_i \leq A_i \cdot R_{yi} \cdot \varphi_i, \quad (2)$$

$$N_i \leq A_i \cdot R_{yi},$$

where N_i — longitudinal force in the i -th structural element; R_{yi}, A_i, φ_i — respectively design resistance, cross-sectional area and stability factor (longitudinal bending) of each i -th element;

- condition on the minimum cross-sectional area of the support element:

$$A_i \geq [A_i], \quad (3)$$

where $[A_i]$ is the minimum permissible area of the i -th element according to the criteria of ultimate flexibility or structural requirements;

- values of unknowns:

$$J_i \geq X_i \geq j_i, \quad (4)$$

where J_i and j_i are the upper and lower bounds of variability of the varied parameters.

Basic conditions satisfied by the vector of varying parameters (1):

- equilibrium condition:

$$k(x) \cdot \beta - P(x) = 0, \quad (5)$$

where $k(x)$ is the stiffness matrix of the system; β is the vector of nodal displacements; $P(x)$ is the vector of external loads;

- joint deformation condition:

$$\Delta L_{N_i}(N_i, A_i, l_i) = \Delta L_i(\Delta x, \Delta y, \Delta z), \quad (6)$$

where ΔL_{N_i} and ΔL_i are the deformation of the i -th and $i + 1$ elements, respectively.

The algorithm of optimal design with selection of element cross-sections and determination of the mass of the overhead line support is shown in Fig. 5.

The vector of varying parameters is calculated in the following sequence: static calculation is performed for normal, emergency and installation modes of operation of the narrow-base support; for each mode the forces and stresses in the support elements are determined; the cross-sections are selected according to the design forces and the stresses and flexibility of the elements are checked; the narrow-base support is recalculated taking into account the specified stiffnesses of the elements; the mass of individual elements and the whole structure is calculated.

The results of selection of cross-sections of the representative support shown in Fig. 6, are given in Table 1.

Table 1. Selection of cross-sections of elements of the double-circuit 35 kV overhead line support of P-35-2 type

Section	Element	Force, t		Section, mm	Area, cm ²	Flexibility	Stresses, kg/cm ²		Bolts	
		compression	stretching				σ	R_y	Quantity	Strength class
Ground wire peak	Belt	2.26	2.30	L50 × 50 × 5	4.80	155	2,379	2,400	1M16	4.6

Section	Element	Force, t		Section, mm	Area, cm ²	Flexibility	Stresses, kg/cm ²		Bolts	
		compression	stretching				σ	R_y	Quantity	Strength class
Barrel upper part	Belt Strut	32.65	31.43	$L100 \times 100 \times 7$	13.75	37	2,932	3,350	6M20	5.8
		3.41	1.97	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	88	2,181	2,400	2M12	5.8
Barrel centre section	Belt Strut	83.34	81.61	$L160 \times 160 \times 10$	31.43	23	3,107	3,150	12M24	5.8
		3.40	3.40	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	82	2,051	2,400	2M12	5.8
Barrel lower part	Belt Strut	98.08	96.24	$L200 \times 200 \times 12$	47.10	20	2,440	3,150	8M30	5.8
		3.40	3.09	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	87	2,166	2,400	2M12	5.8
Traversa 1	Traction	0.13	0.82	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	158	357	2,400	1M12	5.8
	Belt	0.87	0.21	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	93	632	2,400	1M12	5.8
	Strut	0.13	0.13	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	80	83	2,400	1M12	5.8
Traversa 2	Traction	0.0	1.09	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	158	829	2,400	1M12	5.8
	Belt	3.73	2.52	$L45 \times 45 \times 4$	3.48	88	2,260	2,400	2M12	5.8
	Strut	0.82	0.61	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	102	659	2,400	1M12	5.8
Diaphragms	Strut	2.17	2.17	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	101	1,730	2,400	1M12	5.8
	Strut	3.00	3.00	$L40 \times 40 \times 4$	3.08	71	1,728	2,400	2M12	5.8
Consoli	Belt	0.96	0.96	$L63 \times 63 \times 5$	6.13	120	1,917	2,400	1M12	4.6

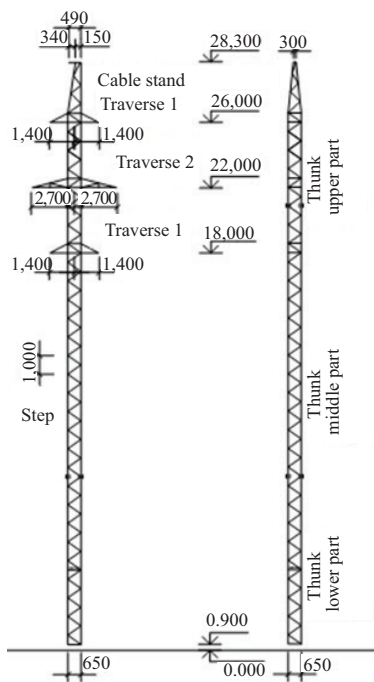


Fig. 6. Intermediate tower double-circuit support for 35 kV overhead lines

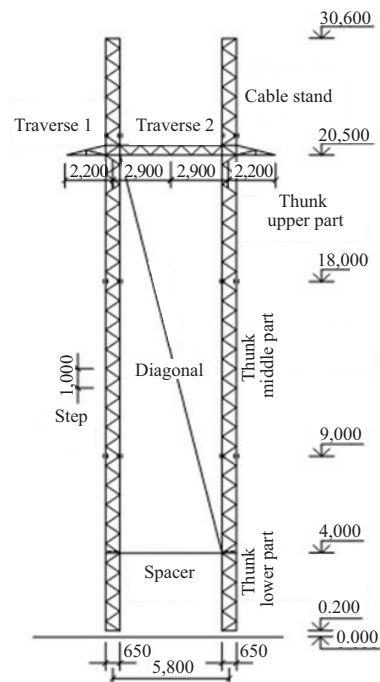


Fig. 7. Anchor-angle portal single-circuit support for 110 kV overhead lines

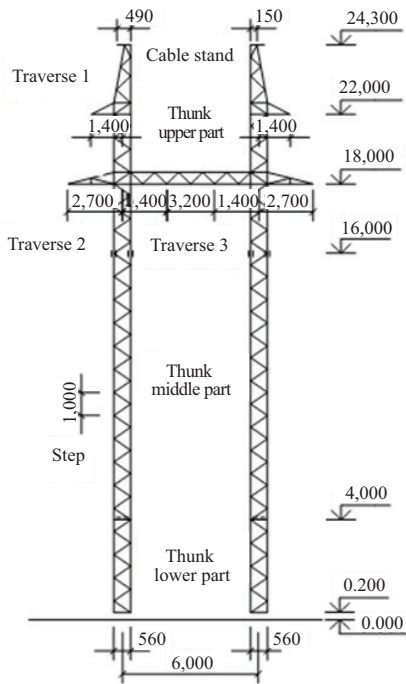


Fig. 8. Intermediate portal double-circuit support of overhead line 35 kV

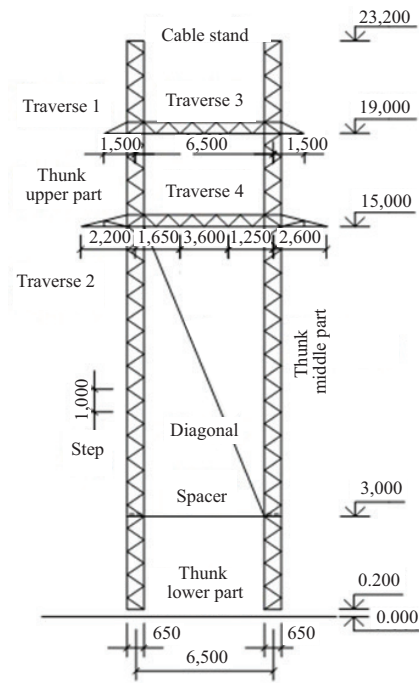


Fig. 9. Anchor-angle portal double-circuit support of overhead line 35 kV

Table 2. Masses of the designed single and portal supports of 35 and 110 kV overhead power lines

Support type	Single-post support			Portal support		
	Cipher	Height, m	Weight, kg	Cipher	Height, m	Weight, kg
Intermediate single-circuit 35 kV	P-35-1	24.1	1,719	–	–	–
Anchor-corner single-circuit 35 kV	AU-35-1	22.5	3,421	PAU-35-1	19.0	4,115
Intermediate double-circuit 35 kV	P-35-2	27.4	3,755	PP-35-2	24.1	3,932
Anchor-corner double-circuit 35 kV	AU-35-2	26.7	6,193	PAU-35-2	23.0	6,493
Intermediate single-circuit 110 kV	P-110-1	32.0	3,879	PP-110-1	26.5	3,235
Anchor-corner single-circuit 110 kV	AU-110-1	34.1	8,430	PAU-110-1	30.4	9,376

As an example, Fig. 6–9 shows some developed new lattice anchor-angle and intermediate single post and portal supports for 35 and 110 kV transmission lines.

In total eleven supports were investigated: six single tower-type supports (P-35-1, AU-35-1, P-35-2, AU-35-2, P-110-1, AU-110-1) and five gantry-type supports (PAU-35-1, PP-35-2, PAU-35-2, PP-110-1, PAU-110-1).

The masses of designed tower and portal supports of single-circuit and double-circuit supports of 35

and 110 kV overhead power lines are given in Table 2. The masses of supports were determined taking into account auxiliary parts and hardware.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Optimum design forms of narrow-base supports according to the area of definition of 35 and 110 kV overhead power lines have been developed. The designed narrow-base supports comply with domestic design norms, are technologically advanced in manufacturing, installation and operation.

On the basis of the proposed numerical method of optimization, at which geometrical dimensions and topology of supports, and also parameters of weight, labour intensity and cost are optimized simultaneously, weight and cost parameters of narrow-base supports are additionally reduced up to 20 %.

According to the results of the conducted researches rational application areas of optimal narrow-base supports of portal and tower types are determined.

Portal free-standing supports with and without reinforcing diagonals are rational in anchor-angle supports of 110 kV voltage, especially at large loads from the plane and significant terrain relief differences, as well as in intermediate supports of 110 kV voltage at the height of supports up to 27 metres. On 35 kV overhead lines, the use of free-standing gantry supports has a positive effect only for intermediate supports up to 20 m high.

REFERENCES

1. Kryukov K.P., Novgorodtsev B.P. *Design and mechanical analysis of power transmission lines*. Lenin-grad, Energy, 1979; 312. (rus.).
2. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. Atypical structural systems for mobile communication towers. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 365:052010. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052010
3. Shevchenko E.V. Analysis of stability criteria for overhead lattice tower type supports. *Bulletin of DNACEA*. 2013; 13(4):101-114. (rus.).
4. Shapovalov S.N., Udod E.I. *Increase of reliability and durability of electric grid structures*. Kiev, Buildings, 2017; 434.
5. Vedyakov I.I., Ereemeev P.G., Solovyev D.V. Scientific and technical support and standard requirements when realizing projects of buildings and structures with increased level of responsibility. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 12:14-19. EDN VRJMYQ. (rus.).
6. Nazim Ya.V. Features of design structures for overhead line's transition supports. *Modern Industrial and Civil Constructions*. 2019; 11(3):38-49. (rus.).
7. Mironov A.N., Shevchenko E.V. Problems of stability of tower-type overhead lattice support rods. *Bulletin of DNACEA*. 2017; 3(113):11-24. (rus.).
8. Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Fedorova S.R. Monitoring of single-post free-standing supports of overhead power lines under the action of wind loads. *Housing Construction*. 2023; 12:73-78. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-73-78. EDN ZSSEHX. (rus.).
9. Senkin N.A., Filimonov A.S. Interaction of structural elements in the overhead transmission power line. *Housing Construction*. 2024; 1-2:101-108. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-101-108. EDN SCMQKH. (rus.).
10. Efimov E.N., Timashova L.V., Yasinskaya N.V. Causes and nature of damage to components of overhead power transmission lines with voltage of 110–750 kV in 1997–2007. *Energy of Unified Grid*. 2012; 5(5):32-41. EDN VXCBYN. (rus.).
11. Shevchenko Ye., Nazim Ya., Tanasoglo A., Garanzha I. Refinement of Wind Loads on Lattice Support Structures of the Intersystem Overhead Power Transmission Lines 750kV. *Procedia Engineering*. 2015; 117:1028-1035. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.225
12. Khawaja A.H., Huang Q., Khan Z.H. Monitoring of Overhead Transmission Lines : a Review from the Perspective of Contactless Technologies. *Sensing and Imaging*. 2017; 18(1). DOI: 10.1007/s11220-017-0172-9
13. Ohsaki M. *Optimization of Finite Dimensional Structures*. Tokyo, CRC Press Taylor & Francis Group, 2019; 221.
14. *A.S.C.E Design of Latticed Steel Transmission Structures*. New York, A.S.C.E, 2021; 98.
15. Bazant Z.P., Cedolin L. *Stability of structures*. New York, Oxford University Press, 2010; 1011. DOI: 10.1142/9789814317047
16. Coskun S.B. *Advances in computational stability analysis*. Rijeka, InTech, 2018; 132.
17. Winterstetter T., Schmidt H. Stability of circular cylindrical steel shells under combined loading. *Thin-Walled Structures*. 2002; 40(10):893-910. DOI: 10.1016/S0263-8231(02)00006-X
18. Yoo C.H., Lee S.C. *Stability of structures — principles and applications*. New York, Elsevier Academic Press, 2017; 529.
19. Yang B. *Stress, strain, and structural dynamics : an interactive handbook of formulas, solutions, and MATLAB Toolboxes*. Cambridge, Elsevier Academic Press, 2020; 314.
20. Gorokhov E.V., Vasilev V.N. Strength tests of stability for fragments of tower supports of 330 kV overhead lines. *Modern Industrial and Civil Constructions*. 2019; 15(3):53-62. (rus.).
21. Nazim Ya.V., Gorokhov E.V. The grid optimization of overhead line supports according to the criterion of rod stability. *Metal Constructions*. 2017; 21(2):20-36. (rus.).
22. Vasilev V.N., Salivon Yu.I., Bakaev S.N. Algorithm for monitoring the technical condition of lattice steel supports of high-voltage overhead transmission lines. *Metal Constructions*. 2018; 18(2):135-149. (rus.).
23. Kondrateva O.E., Voronkova E.M., Loktionov O.A. Impact assessment of weather and climate

events on overhead transmission lines reliability with voltages up to 110–220 kV. *2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2021; 1-6. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388054

24. Senkin N.A. Consideration of progressive collapse in the design of overhead power transmission line supports. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 4(93):37-46. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-37-46. EDN MXCQXB. (rus.).

Received October 2, 2024.

Adopted in revised form on October 14, 2024.

Approved for publication on October 15, 2024.

B I O N O T E S: **Anton V. Tanasoglo** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1213498, Scopus: 56826221800, ResearcherID: JFA-6248-2023, ORCID: 0000-0002-1825-2738; a.v.tan@mail.ru;

Igor M. Garanzha — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 564746, Scopus: 56437725200, ResearcherID: AAD-8595-2022, ORCID: 0000-0002-6687-7249; garigo@mail.ru;

Anatoliy N. Orzhekhovskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture**; 22 Derzhavina st., Makeevka, 86123, DPR, Russian Federation; ID RSCI: 968202, Scopus: 57214804876, ResearcherID: AAP-3799-2021, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Milena M. Pisareva — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; milena.pisareva.02@bk.ru.

Contribution of the authors:

Anton V. Tanasoglo — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Igor M. Garanzha — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Anatoliy N. Orzhekhovskiy — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Milena M. Pisareva — research concept, writing of the article, data gathering and processing, conclusions.

The authors declare that they have no conflict of interest.