

Проектирование стальных решетчатых конструкций линий электропередачи с использованием параметров надежности на примере анкерно-угловой опоры У220-2+9

Анатолий Николаевич Оржеховский¹, Антон Владимирович Танасогло²,
Игорь Михайлович Гаранжа², Владимир Филиппович Муцанов¹,
Наталья Сергеевна Смирнова¹

¹ Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА);
г. Макеевка, ДНР, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение надежности решетчатых конструкций опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) является первоочередной задачей проектировщика. Если расчет и проектирование типовых конструкций массового строительства ведется в соответствии с действующими нормативными документами, то вопрос обеспечения гарантируемого минимально требуемого уровня надежности опор ВЛ осуществляется с применением различного рода коэффициентов надежности. По сути, остаются FORM-методы (методы определения надежности строительных конструкций первого порядка), так как SORM-методы (методы второго порядка) крайне сложны в реализации. При этом однозначный алгоритм определения характеристик надежности конструкций опор ВЛ действующие нормативные документы не дают.

Материалы и методы. Предлагается методика определения склонности стальных конструкций линий электропередачи к лавинообразному обрушению на базе численного обоснованного установления исключаемых элементов системы для формирования вторичной расчетной схемы. В основе лежит расчет на базе метода конечных элементов (МКЭ) в геометрически и конструктивно-нелинейной постановке. Данная методика позволяет четко выявить наиболее ответственные стержни конструкции, а не назначать их на основе инженерного опыта или рекомендаций.

Результаты. Приводится методика определения численных характеристик надежности стальных конструкций линий электропередачи на базе МКЭ в стохастической постановке. В качестве ключевой характеристики выступает дальность отказа β . Искомая надежность системы находится между нижним значением $\beta_{\min}$ (характеристика одного наиболее ответственного элемента системы) и верхним значением $\beta_{\max}$ (характеристика для группы наиболее ответственных элементов системы), установленных при анализе конструкции на склонность к лавинообразному обрушению. С целью апробации предложенных методик выполнен анализ надежности анкерно-угловой опоры У220-2+9. По результатам расчетов выявлена недостаточная надежность конструкции для расчетной ситуации с максимальными из рассматриваемых нагрузок.

Выводы. Разработана методика анализа склонности стальных стержневых конструкций опор линий электропередачи к лавинообразному обрушению, позволяющая определять наиболее опасные элементы системы для конкретно заданного вида нагружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздушная линия электропередачи, надежность, башенная решетчатая опора, напряженно-деформированное состояние, расчетная модель, численные исследования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Оржеховский А.Н., Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Муцанов В.Ф., Смирнова Н.С. Проектирование стальных решетчатых конструкций линий электропередачи с использованием параметров надежности на примере анкерно-угловой опоры У220-2+9 // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.5

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

Design of steel lattice structures of power transmission lines using reliability parameters on the example of anchor-angle support U220-2+9

Anatoliy N. Orzhehovskiy¹, Anton V. Tanasoglo², Igor M. Garanzha²,
Vladimir F. Mushchanov¹, Natalia S. Smirnova¹

¹ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture; Makeevka, DPR, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the reliability of lattice structures of overhead line (OL) supports is the primary task of the designer. If the calculation and design of typical structures of mass construction is carried out in accordance with the current regulatory documents, then the issue of ensuring the guaranteed minimum required level of reliability of OL supports is carried out by using various types of reliability factors. In fact, FORM methods (first-order methods for determining the reliability of building structures) remain, since SORM methods (second-order methods) are extremely difficult to implement. At the same time, current regulatory documents do not provide an unambiguous algorithm for determining the reliability characteristics of OL support structures.

Materials and methods. The paper proposes a method for determining the susceptibility of steel structures of power transmission lines to avalanche-like collapse based on a numerically reasonable determination of the excluded elements of the system for forming a secondary calculation scheme. It is based on the calculation based on the finite element method in a geometrically and structurally nonlinear formulation. This method allows for a clear determination of the most critical structural rods, rather than assigning them based on engineering experience or recommendations.

Results. A method for determining the numerical reliability characteristics of steel structures of power transmission lines is proposed based on the finite element method in a stochastic formulation. The failure range β serves as the main characteristic. The sought reliability of the system is between the lower value of $\beta_{\min}$ (the characteristic of one of the most critical elements of the system) and the upper value of $\beta_{\max}$ (the characteristic for a group of the most critical elements of the system), determined during the analysis of the structure for the tendency to avalanche-like collapse. In order to test the proposed methods, the reliability of the anchor-angle support U220-2+9 was analysed. Based on the calculation results, insufficient reliability of the structure for the design situation with the maximum of the considered loads was revealed.

Conclusions. A technique was developed for analyzing the tendency of steel rod structures of power transmission line supports to avalanche-like collapse, which makes it possible to determine the most dangerous elements of the system for a specific type of loading.

KEYWORDS: overhead power line, reliability, tower lattice support, stress-strain state, calculation model, numerical studies

FOR CITATION: Orzhehovskiy A.N., Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Mushchanov V.F., Smirnova N.S. Design of steel lattice structures of power transmission lines using reliability parameters on the example of anchor-angle support U220-2+9. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):5. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.5

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

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности строительных конструкций является первоочередной задачей проектировщика [1, 2]. Если расчет и проектирование типовых конструкций массового строительства ведется в соответствии с действующими нормативными документами, такими как СП, ГОСТ и т.д., то вопрос обеспечения гарантируемого минимально требуемого уровня надежности осуществляется с помощью различного рода коэффициентов надежности [3, 4].

В случае с нетиповыми конструкциями или конструкциями, имеющими повышенный уровень ответственности, разрушение которых может привести к значительным экономическим последствиям или человеческим жертвам, целесообразным становится применение вероятностно-статистических методов обоснования реальных физико-механических характеристик материалов [5]. Тогда обеспечение

требуемого уровня надежности системы определяется путем приведения численных характеристик надежности к минимально требуемым нормативными величинами, которые представлены в ГОСТ Р ИСО 2394–2016 «Конструкции строительные. Основные принципы надежности».

В качестве численных характеристик надежности используются характеристика безопасности β и вероятность отказа P_f [6]. Их определение — непростая задача для инженера. ГОСТ Р ИСО 2394–2016 дает ряд способов вычисления вероятности отказа:

- точными аналитическими методами;
- методами численного интегрирования;
- приближенными аналитическими методами (FORM/SORM методами моментов);
- методами моделирования или сочетанием этих методов.

Для сложных много раз статически неопределимых систем применение точных аналитических

методов и методов численного интегрирования практически неосуществимо. Так как невозможно установить целевую функцию надежности. Методы моделирования требуют значительных затрат времени и ресурсов, переводя инженерную задачу практически в область научных исследований. По сути, остаются FORM-методы (методы определения надежности строительных конструкций первого порядка), так как SORM-методы (методы определения надежности строительных конструкций второго порядка, использующие случайные процессы в описании стохастических величин) крайне сложны в реализации [7]. При этом однозначный алгоритм определения характеристик надежности конструкции действующие нормативные документы не дают, ограничиваясь общими рекомендациями и описаниями предлагаемых методов.

Делая вывод, можно отметить, что современному инженеру необходима четкая и однозначная методика определения характеристик надежности, позволяющая обоснованно обеспечивать заданный уровень надежности всех элементов строительной конструкции. Особенно остро этот вопрос стоит при работе с конструкциями повышенного уровня ответственности класса КС-3.

Цель исследования — разработка методики анализа склонности стержневых конструкций опор воздушных линий электропередачи (ВЛ) к лавинообразному обрушению.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработана методика вычисления характеристик надежности стальных стержневых опор линий электропередачи на основе использования дальности отказа;
- выполнен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) решетчатых башенных опор с целью обеспечения рекомендуемого уровня надежности для обоснованного количества конкретных стержней, что позволило сократить металлоемкость опор при обеспечении рекомендуемого уровня надежности на этапе проектирования;
- произведена апробация разработанной методики на металлической анкерно-угловой опоре У220-2+9 в различных режимах работы.

Предмет исследования — численные показатели надежности элементов конструкций решетчатых башенных опор ВЛ.

В качестве объекта исследования приняты конструкции стальных двухцепных решетчатых башенных анкерно-угловых опор ВЛ 220 кВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Высоковольтные линии электропередачи — это сложные составные системы, снабжающие электроэнергией потребителей разной мощности. В зависимости от уровня последствий при разрушении или выходе из строя ВЛ конструкции опор могут от-

носиться к классам КС-3 или КС-2, в соответствии с градацией, используемой в ГОСТ 27751–2014.

Из анализа публикаций, посвященных обеспечению прочности и надежности технического состояния конструкций стальных опор ВЛ, следует, что значительный вклад в изучение данного вопроса внесли: Е.В. Горохов, Е.В. Шевченко, В.Н. Васылев, В.И. Золотарев, Н.А. Сенькин [8, 9], И.П. Смирнов, А.В. Козлов, Н.А. Семенов, а также J. Smith, A. Johnson, K. Müller, M. Garcia, H. Tanaka, L. Wei, E. Johnson, J. Martinez и др. В работах этих авторов серьезное внимание уделяется вопросам мониторинга технического состояния и изучению НДС конструкций. Разработаны конструктивные подходы усиления элементов и узловых соединений.

Некоторые из вышеприведенных авторов рассматривают вопросы каскадного обрушения ВЛ в масштабе всей линии, но не затрагивают область лавинообразного обрушения конкретной опоры [10, 11]. При этом обеспечение отсутствия склонности к лавинообразному обрушению конструкции опоры указано в нормативных документах. Особенно этот критерий важен для анкерных, угловых и концевых опор. Вопросом обеспечения устойчивости к прогрессирующему обрушению занимается не так много авторов. Следует отметить ряд зарубежных исследователей [12, 13], а также соотечественников [14, 15]. Но во всех этих работах анализ ведется с помощью таких программных комплексов, как ЛИРА или ее аналоги. Следовательно, все вышеописанные спорные вопросы не затрагиваются.

Надежность рассматривается как состояние конструкции без дефектов и повреждений. Если таковые имеются, то они подлежат устранению (усиление элементов или узлов конструкции). После этого опора считается удовлетворяющей требованиям надежности. Численные характеристики надежности не устанавливаются и уровень надежности конструкции не анализируется. В свою очередь, нормативные документы определяют надежность как способность конструкции выполнять свои функции в течение расчетного (предусмотренного) срока эксплуатации. Соответственно, становится вопрос об эффективности, а также обоснованности применения конструктивного решения используемого усиления.

Надежность конструкции ВЛ напрямую связана со способностью противостоять прогрессирующему обрушению системы. В СП 385.1325800.2018 даны рекомендации по выбору исключаемого элемента рамных конструкций для формирования вторичной расчетной схемы. Вторичная расчетная схема используется для выполнения анализа склонности конструкции к прогрессирующему обрушению. Стоит подчеркнуть отсутствие четкого понятного регламентированного алгоритма выбора исключаемого элемента опоры при анализе склонности конструкции к прогрессирующему обрушению. Это создает неопределенность в подходе к расчету. Также в некото-

рых случаях вызывает настороженность применение коэффициента динамичности, равного двум при исключении элемента из первичной расчетной схемы. В конструкциях, выполненных из малоуглеродистой стали, мгновенное (хрупкое) разрушение элемента маловероятно. Следовательно, требуется четкий и понятный инженеру алгоритм выбора наиболее ответственных элементов конструкций ВЛ, разрушение которых неминуемо повлечет за собой развитие прогрессирующего обрушения.

Нормы проектирования, основанные на теории надежности, ставят своей целью достижение определенной вероятности того, что разрабатываемая конструкция будет пригодной для использования в течение конкретного периода, учитывая ее расчетный срок службы:

$$P_{fail}(T_i) \leq [P_{fail}], \quad (1)$$

где $[P_{fail}]$ — предписанное значение вероятности отказа.

Из анализа неравенств становится ясно, что основными задачами норм проектирования является обоснование обеих частей неравенства — и правой, и левой.

Для доказательства правой стороны неравенства, т.е. для определения необходимого уровня надежности, требуется выполнить задачу вероятностно-оптимального проектирования, при этом важно учитывать не только экономические факторы, но и социальные критерии.

В упрощенном виде $[P_{fail}]$ для случая установления вероятности отказа конструкции, вызванного любой причиной в течение ее расчетного срока службы $[P_{fail}]''$, предложено определять как:

$$[P_{fail}]'' = \frac{10^{-4} \zeta_s T}{L}, \quad (2)$$

где ζ_s — коэффициент социальной значимости; T — расчетный срок службы конструкции; L — среднее число людей, находящихся внутри сооружения или в непосредственной близости от него в течение периода, за который оценивается риск.

Учитывая, что в силу наличия случайных ошибок, дефектов, несовершенств, которые могут иметь место при проектировании, монтаже и эксплуатации сооружения, в очень упрощенной форме предлагается связать теоретическую и действительную вероятность отказа соотношением $[P_{fail}] = 0,1[P_{fail}]''$.

Тогда требуемое значение теоретической вероятности отказа примет вид:

$$[P_{fail}] = \frac{10^{-5} \zeta_s T}{L}. \quad (3)$$

Для вычисления значений $P_{fail}(T_i)$ используются упрощенные подходы:

- *методы 1-го уровня*, для которых приемлемое значение надежности обеспечивается некоторым количеством частных коэффициентов надежности,

вводимых к характеристическим (нормативным) значениям исходных величин;

- *методы 2-го уровня*, для которых надежность проверяется только в точке на границе области отказа, а неравенство проверяется сравнением индекса надежности.

На основе методов 1-го уровня в работе предложен алгоритм расчета численных показателей надежности в виде характеристики безопасности β . Алгоритм реализован на языке программирования MATLAB и состоит из двух основных расчетных блоков. В первом определяется группа наиболее ответственных элементов, разрушение которых критично для всей системы и неминуемо повлечет начало лавинообразного обрушения. С этой целью выполняется геометрически и конструктивно нелинейный расчет, где в рамках одного вида нагрузки производится пошаговое нагружение системы дополнительной нагрузкой и фиксируются элементы, вылетевшие из работы. Стержни, переставшие удовлетворять условиям прочности, фиксируются по мере увеличения дополнительной нагрузки и передаются во второй расчетный блок.

Группа элементов, вышедших из работы первой очередью (иногда принимается во внимание и вторая очередь, это зависит от желаемой точности анализа системы и количества элементов), считается наиболее ответственной и передается во второй расчетный блок.

Во втором расчетном блоке для группы наиболее ответственных элементов вычисляются численные характеристики надежности. В качестве основной выступает дальность отказа или характеристика безопасности. В качестве стохастических величин рассматриваются геометрические характеристики плоских сечений элементов, прочностные характеристики материала (предел текучести материала), ветровая нагрузка, снеговая нагрузка, геометрические параметры конструкции в виде отклонения координат узлов. Расчет характеристики безопасности осуществляется на основе метода конечных элементов (МКЭ) в вероятностной постановке.

Используя генератор случайных чисел, в рамках заранее определенных законов распределения, генерируются случайные величины. На основе метода Монте-Карло проводится вычисление характеристик безопасности группы наиболее ответственных элементов.

Результатом расчетов в рамках второго расчетного блока выступают две величины:

- β_{min} — минимальное значение характеристики безопасности из группы наиболее ответственных элементов системы;
- β_{max} — характеристики безопасности группы наиболее ответственных элементов системы, работающих параллельно.

Эти две величины и будут определять верхний и нижний пределы надежности конструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предложенная методика анализа склонности системы к лавинообразному обрушению, а также вычислению численных показателей надежности конструкции апробировалась на металлической анкерно-угловой опоре У220-2+9 в различных режимах работы.

Рассматривались расчетные ситуации для режима работы конструкции Шк:

- 1) опора концевая;
- 2) оборван провод, дающий наибольший крутящий момент на опору;
- 3) трос не оборван.

Материал конструкций — углеродистые стали для сварных конструкций ВСт3 по ГОСТ 380–71*, соответствующие С245. Элементы секций соединяются болтами нормальной точности классом 5.6. Пояса смежных секций соединены между собой фланцами на болтах класса 5.6.

Пояса первых трех снизу секций опоры выполнены из уголка 200×16 мм, затем сечение пояса

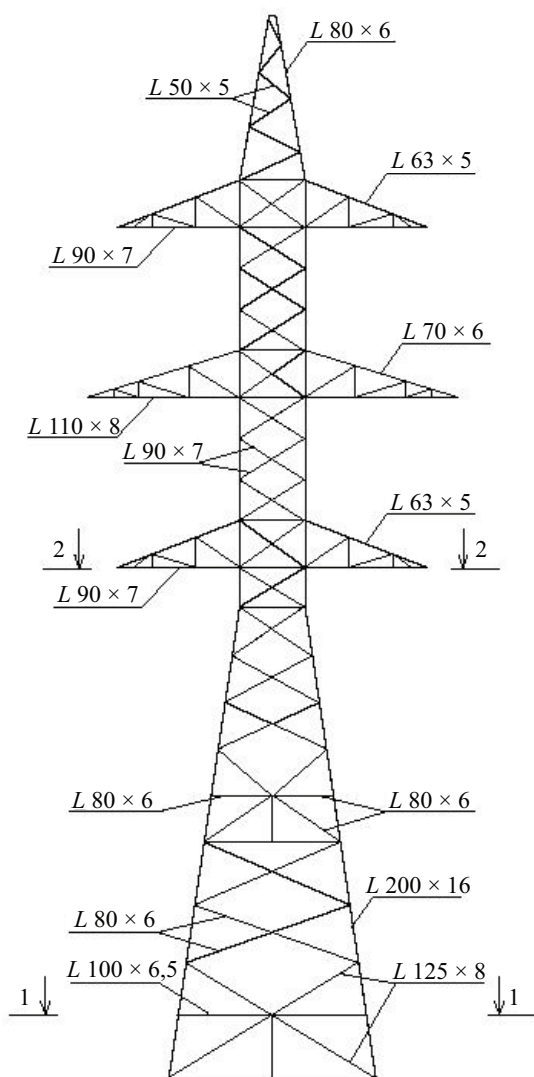


Рис. 1. Сечения основных элементов опоры У220-2+9

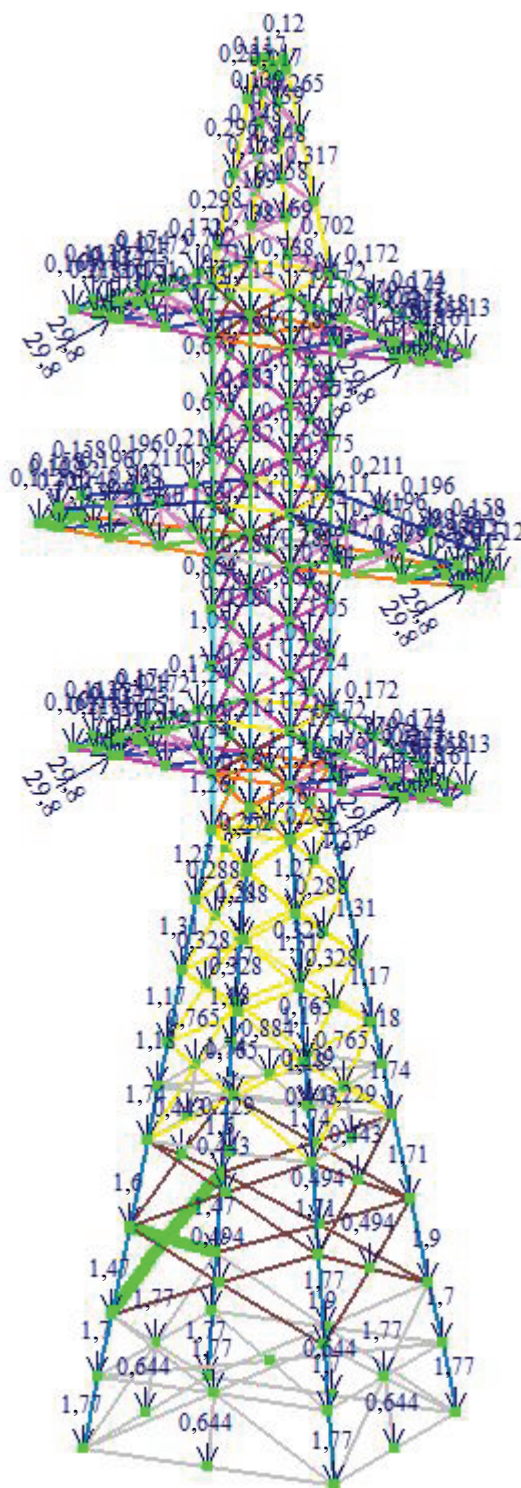


Рис. 2. Расчетная схема концевой опоры У220-2+9 для выполнения поверочных расчетов в ПК ЛИРА-САПР (первая расчетная ситуация)

изменяется на уголки (верхняя секция) 160×10 мм (рис. 1). Пояса тросостойки — уголок 80×6 мм. Сечения раскосов в пределах одной секции одинаковые: раскосы подставки выполнены из уголка 125×8 мм, раскосы первых двух снизу секций изготовлены из уголка 80×6 мм, раскосы верхних секций — уголок 90×7 мм, раскосы тросостойки —

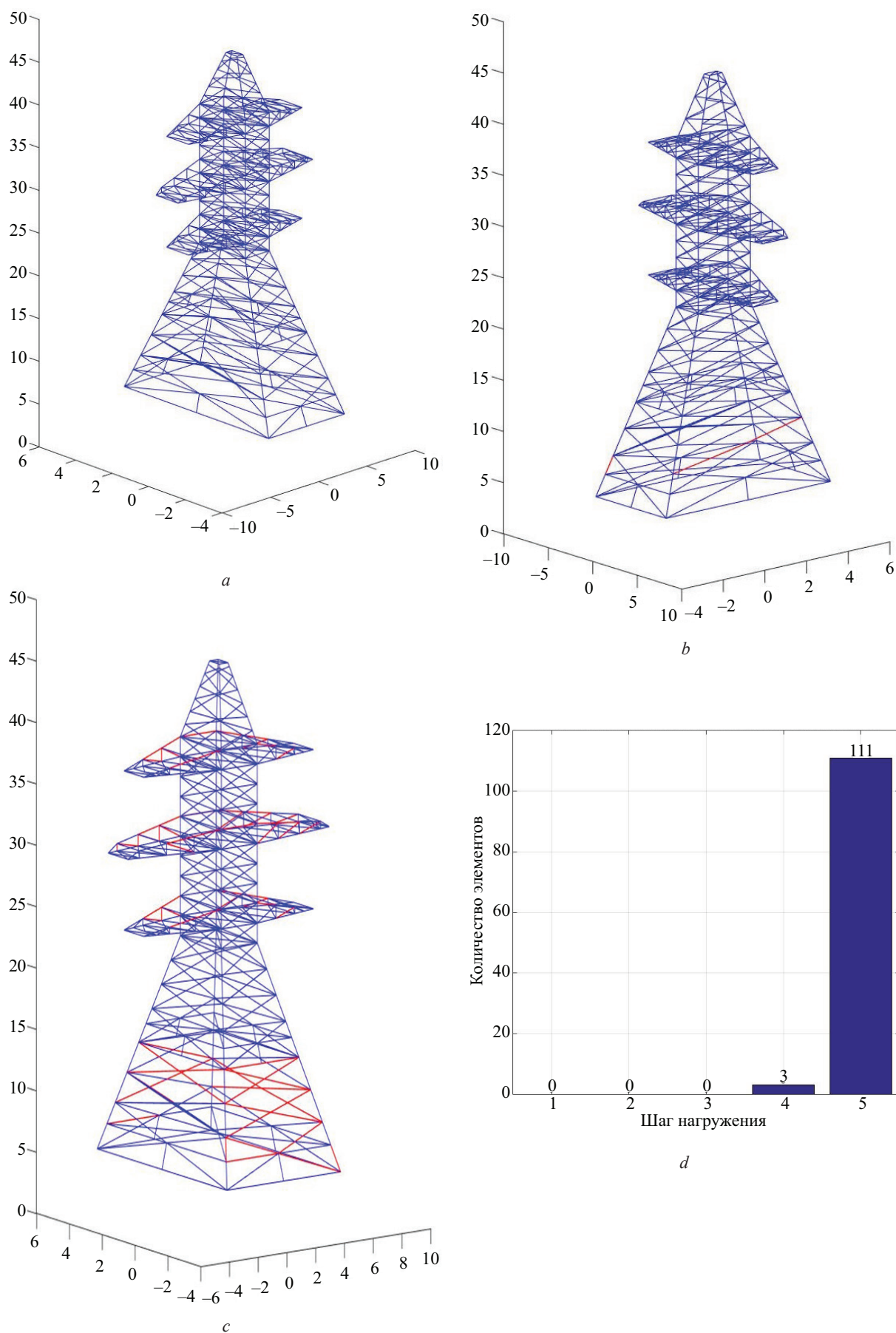


Рис. 3. Расчет опоры У220-2+9 (расчетная ситуация 2): *a* — исходная расчетная схема в MATLAB; *b* — 4-й шаг загрузки, элементы, вышедшие из работы (3 шт.); *c* — 5-й шаг загрузки, элементы, вышедшие из работы (111 шт.); *d* — график выхода элементов при загрузении конструкции временной нагрузкой

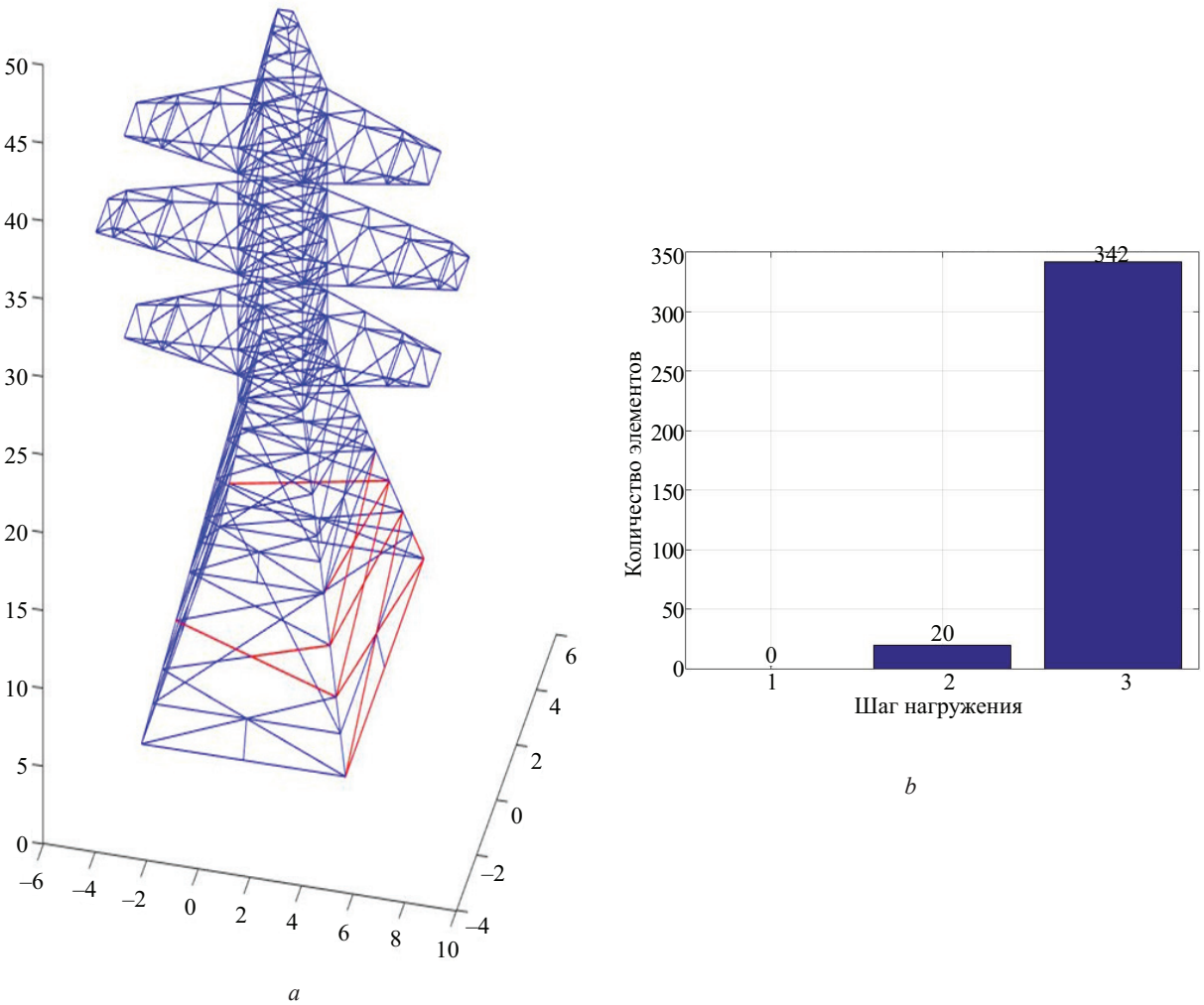


Рис. 4. Расчет опоры У220-2+9 (расчетная ситуация 3): а — 4-й шаг нагружения, элементы, вышедшие из работы (20 шт.); б — график выхода элементов при нагружении конструкции временной нагрузкой

50 × 5 мм. Пояса нижних и верхних траверс — уголок 90 × 7 мм, средней траверсы — уголок 110 × 8 мм. Тяги нижних и верхних траверс — уголок 63 × 5 мм, средней траверсы — 70 × 6 мм. Диафрагмы: нижних секций — уголок 100 × 6,5 мм, в местах примыкания траверс — уголок 110 × 8 мм.

В качестве случайных величин рассматривается собственный вес конструкции, гололедная нагрузка [16], дефекты геометрии конструкции [17] и прочностные свойства материала (предел текучести или условный предел текучести).

Расчетная схема опоры (работающей как консольная), созданная в ПК ЛИРА-САПР для проведения поверочных расчетов, приведена на рис. 2. Графические данные по первой и второй расчетным ситуациям схожи между собой и для второй расчетной ситуации показаны на рис. 3. Информация по третьей расчетной ситуации представлена на рис. 4.

Результаты численного эксперимента приведены в табл. 1.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что при максимальных нагрузках на опору

Табл. 1. Результаты численного определения надежности опоры У220-2+9

Номер расчетной ситуации	Количество наиболее ответственных элементов	Количество шагов нагружения	$\beta_{\min}$	$\beta_{\max}$	ГОСТ Р ИСО 2394–2016 β
1	3	4	9,32	13,95	4,7
2	3	4	6,00	15,17	
3	20	2	3,21	9,08	

Табл. 2. Подбор сечения элементов опоры У220-2+9 с учетом рекомендаций ГОСТ Р ИСО 2394–2016

Номер расчетной ситуации	Количество наиболее ответственных элементов	Количество шагов нагружения	$\beta_{\min}$	$\beta_{\max}$	Масса конструкции, т
3.1	20	2	3,21	9,08	16,294
3.2	8	3	4,75	11,05	17,02

(третья расчетная ситуация) характеристика безопасности не соответствует минимально рекомендуемому нормативному значению.

При этом для третьей расчетной ситуации наблюдается явная склонность конструкции к прогрессирующему обращению, так, выход элементов начинается уже на втором шаге догружения, а на третьем наблюдается лавинообразное разрушение конструкции (рис. 4, *b*).

Для обеспечения требуемого минимального нормативного уровня характеристики безопасности $\beta_{\min}$ увеличим сечение элементов, приведенных на рис. 4, *a* (20 стержней), на одну позицию сортамента и проведем повторный расчет конструкции.

Результаты расчета приведены в табл. 2 (3.1 — исходные параметры, 3.2 — параметры опоры с увеличенными сечениями элементов).

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что характеристика надежности после увеличения сечений 20 наиболее ответственных элементов системы составила 4,75, что превышает рекомендуемое минимальное значение на 0,05.

Уменьшилась склонность рассматриваемой опоры к лавинообразному обрушению, так как количество шагов догружений до начала выхода элементов увеличилось на единицу.

Таким образом, обоснованно определив группу наиболее ответственных элементов конструкции и увеличив их поперечные сечения, обеспечивается рекомендованный уровень надежности системы. При этом масса опоры увеличилась не критично с 16,294 до 17,02 т, что составило 4,46 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана методика анализа склонности стальных стержневых конструкций опор линий электропередачи к лавинообразному обрушению, позволяющая определять наиболее опасные элементы системы для конкретно заданного вида нагружения. Совокупность таких стержней назначается

на основании обоснованного численного расчета. Расчет выполняется на базе МКЭ в геометрически и конструктивно-нелинейной постановке.

Предложена методика вычисления характеристик надежности стальных стержневых опор линий электропередачи. В качестве ключевой характеристики надежности предлагается использовать дальность отказа (характеристику безопасности) β . При этом искомое значение данной характеристики будет находиться между нижней границей надежности $\beta_{\min}$ (характеристика одного наиболее ответственного элемента системы) и верхней границей $\beta_{\max}$ (характеристика для группы наиболее ответственных элементов системы), определенных при анализе конструкции на склонность к лавинообразному обрушению.

Предложенные методики апробированы на металлической анкерно-угловой опоре У220-2+9 в различных режимах работы. В режиме с наибольшими нагрузками значение характеристики безопасности ($\beta_{\min} = 3,21$) приняло меньше рекомендуемого ГОСТ ($\beta_{\text{норм}} = 4,7$). После увеличения сечений группы наиболее ответственных элементов (20 стержней) и повторном определении характеристики надежности она превысила минимально рекомендуемый уровень и составила $\beta_{\min} = 4,75$. Масса конструкции увеличилась всего на 4,46 % с 16,294 до 17,02 т.

Разработанные методики позволяют определять «тонкие места» стержневых опор линий электропередачи и увеличивать сечения элементов с целью обеспечения рекомендуемого уровня надежности для обоснованного количества конкретных стержней. Это дает возможность значительно сократить металлоемкость опоры при обеспечении рекомендуемого уровня надежности системы на этапе проектирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Бармотин А.А., Дмитренко Е.А., Волков А.С., Маисталер С.Н., Недорезов А.В., Казак К.А. и др.

Информационное моделирование при выполнении обследования зданий // Современное промышленное и гражданское строительство. 2024. Т. 20. № 2. С. 93–109. EDN WFDUZE.

3. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Цепляев М.Н., Муцанов А.В. Комплексный подход к оценке надежности пространственных металлических конструкций // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. № 1. С. 6–23. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.1. EDN WGPYND.

4. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Кащенко М.П., Зубенко А.В. Надежность пространственных стержневых конструкций усеченных большепролетных куполов // Металлические конструкции. 2023. Т. 29. № 1. С. 47–61. EDN RWWBHA.

5. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Кащенко М.П., Дудов Н.В. Обеспечение регламентируемого уровня надежности стальной стержневой конструкции повышенной ответственности на примере покрытия СК «Ильичёвец» в г. Мариуполь // Металлические конструкции. 2025. Т. 31. № 1. С. 35–46. DOI: 10.71536/mc.2025.v31n1.4. EDN ICQFZG.

6. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Муцанов А.В., Цепляев М.Н. Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 5. С. 763–777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777. EDN GEAKON.

7. Смирнова Н.С. Оптимизация реконструкции воздушных линий электропередачи с учетом надежности энергоснабжения потребителей : дис. ... канд. техн. наук. Макеевка, 2023. 187 с.

8. 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.

9. Сенькин Н.А., Филимонов 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 SCMQRN.

10. Arsalan H., Zeashan H., Qi 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

11. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. Atypical structural systems for mobile communication towers // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue 5. P. 052010. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052010

12. Fu X., Li H.N., Li G., Dong Z.Q., Zhao M. Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity // Engineering Structures. 2021. Vol. 233. P. 111913. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111913

13. Fu X., Wang J., Li H.N., Li J.X., Yang L.D. Full-scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission tower under Extreme Wind Loads // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2019. Vol. 190. Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.04.011

14. Филимонов А.С. Предложения по защите промежуточной опоры ВЛ 750 кВ с оттяжками от прогрессирующего обрушения // Серия «Строительство» : сб. ст. магистрантов и аспирантов. 2021. С. 391–398. EDN LNFUUV.

15. Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Федорова С.Р. Мониторинг одностоечных 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.

16. 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

17. Garanzha I.M., Tanasoglo A.V., Ademola H.A., Pisareva M.M. Dynamic behavior of power transmission line supports under wind influence // Magazine of Civil Engineering. 2025. No. 18 (1). P. 13301. DOI: 10.34910/MCE.133.1

Поступила в редакцию 13 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 16 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 16 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: 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;

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 строитель-

ный 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;

Владимир Филиппович Мущанов — доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 86123, г. Макеевка, ДНР, ул. Державина, д. 22; SPIN-код: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Наталья Сергеевна Смирнова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 86123, г. Макеевка, ДНР, ул. Державина, д. 22; Scopus: 59175404500, ResearcherID: NHP-9779-2025, ORCID: 0009-0009-0589-1686; n.s.smirnova@donnasa.ru.

Вклад авторов:

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

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.

Мущанов В.Ф. — идея, концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Смирнова Н.С. — написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Ensuring the reliability of building structures is a priority task for designers [1, 2]. If the calculation and design of standard structures for mass construction are carried out in accordance with current regulatory documents, such as CP, GOST, etc., then the issue of ensuring a guaranteed minimum required level of reliability is implemented using various types of reliability coefficients [3, 4].

In the case of non-standard structures or structures with an increased level of responsibility, the destruction of which can lead to significant economic consequences or human casualties, it becomes expedient to use probabilistic-statistical methods to justify the real physical and mechanical characteristics of materials [5]. In this case, the required level of system reliability is determined by bringing the numerical reliability characteristics to the minimum values required by the standards, which are presented in GOST R ISO 2394–2016 “Building structures. Basic principles of reliability”.

The safety factor β and the probability of failure P_f are used as numerical reliability characteristics [6]. Determining these is a difficult task for an engineer. GOST R ISO 2394–2016 provides a number of methods for calculating the probability of failure:

- precise analytical methods;
- numerical integration methods;
- approximate analytical methods (FORM/SORM moment methods);
- modelling methods or a combination of these methods.

For complex systems that are statically indeterminate in many ways, the use of precise analytical methods and numerical integration methods is practically

impossible. This is because it is impossible to establish a target reliability function. Modelling methods require considerable time and resources, turning the engineering task into a scientific research project. In essence, FORM methods (methods for determining the reliability of first-order building structures) remain, since SORM methods (methods for determining the reliability of second-order building structures using random processes in the description of stochastic quantities) are extremely difficult to implement [7]. At the same time, current regulatory documents do not provide a clear algorithm for determining the reliability characteristics of a structure, limiting themselves to general recommendations and descriptions of the proposed methods.

In conclusion, it can be noted that modern engineers need a clear and unambiguous methodology for determining reliability characteristics, allowing them to reasonably ensure the specified level of reliability of all elements of a building structure. This issue is particularly acute when working with structures of increased responsibility class KS-3.

The aim of the study is to develop a methodology for analyzing the susceptibility of overhead line (OL) support structures to avalanche-like collapse.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- a method for calculating the reliability characteristics of steel rod power line supports based on the use of failure distance was developed;
- an analysis of the stress-strain state (SSS) of lattice tower supports was performed in order to ensure the recommended level of reliability for a reasonable number of specific rods, which made it possible to reduce the metal capacity of the supports while ensuring the recommended level of reliability at the design stage;

- the developed methodology was tested on a U220-2+9 metal anchor-angle support in various operating modes.

The subject of the study is the numerical reliability indicators of the structural elements of lattice tower supports for overhead power lines.

The objects of the study are the structures of steel double-circuit lattice tower anchor-corner supports for 220 kW power lines.

MATERIALS AND METHODS

High-voltage power lines are complex composite systems that supply electricity to consumers of various capacities. Depending on the level of consequences in the event of destruction or failure of the power line, support structures can be classified as KS-3 or KS-2, in accordance with the gradation used in GOST 27751–2014.

An analysis of publications devoted to ensuring the strength and reliability of the technical condition of steel power line support structures shows that significant contributions to the study of this issue have been made by: E.V. Gorokhov, E.V. Shevchenko, V.N. Vasilev, V.I. Zolotarev, N.A. Senkin [8, 9], I.P. Smirnov, A.V. Kozlov, N.A. Semenov, as well as J. Smith, A. Johnson, K. Müller, M. Garcia, H. Tanaka, L. Wei, E. Johnson, J. Martinez, and others. The works of these authors pay serious attention to the issues of monitoring the technical condition and studying the stress-strain state of structures. Design approaches for strengthening elements and node connections have been developed.

Some of the above authors consider issues of cascading collapse of power lines on a line-wide scale, but do not touch upon the area of avalanche-like collapse of a specific support [10, 11]. At the same time, ensuring that the support structure is not prone to avalanche-like collapse is specified in regulatory documents. This criterion is especially important for anchor, corner, and end supports. Not many authors deal with the issue of ensuring resistance to progressive collapse. A number of foreign researchers [12, 13] and Russian researchers [14, 15] should be noted. However, in all these works, the analysis is carried out using software packages such as LIRA or its analogues. Consequently, all the above-discussed controversial issues are not addressed.

Reliability is considered to be the condition of a structure without defects or damage. If any are found, they must be eliminated (by reinforcing structural elements or assemblies). After that, the support is considered to meet reliability requirements. Numerical reliability characteristics are not established and the reliability level of the structure is not analyzed. In turn, regulatory documents define reliability as the ability of a structure to perform its functions during its design (intended) service life. Accordingly, the question arises about the effectiveness and validity of the structural solution used for reinforcement.

The reliability of a power line structure is directly related to its ability to withstand progressive collapse

of the system. CP 385.1325800.2018 provides recommendations on selecting the excluded element of frame structures for forming a secondary design scheme. The secondary design scheme is used to analyze the structure's susceptibility to progressive collapse. It is worth emphasizing the lack of a clear, understandable, regulated algorithm for selecting the excluded support element when analyzing the structure's susceptibility to progressive collapse. This creates uncertainty in the approach to calculation. In some cases, the use of a dynamic coefficient equal to two when excluding an element from the primary calculation scheme also raises concerns. In structures made of low-carbon steel, instantaneous (brittle) failure of an element is unlikely. Consequently, a clear and understandable algorithm is required for engineers to select the most critical elements of overhead line structures, the failure of which will inevitably lead to progressive collapse.

Design standards based on reliability theory aim to achieve a certain probability that the structure under development will be suitable for use during a specific period, taking into account its design life:

$$P_{fail}(T) \leq [P_{fail}], \quad (1)$$

where $[P_{fail}]$ is the prescribed failure probability value.

From the analysis of inequalities, it becomes clear that the main tasks of design standards are to justify both parts of the inequality — the right and the left.

To prove the right side of the inequality, i.e. to determine the required level of reliability, it is necessary to perform a probabilistic optimal design task, taking into account not only economic factors but also social criteria.

In simplified form $[P_{fail}]$ for the case of establishing the probability of failure of a structure caused by any reason during its design life $[P_{fail}]''$, it is proposed to define it as:

$$[P_{fail}]'' = \frac{10^{-4} \zeta_s T}{L}, \quad (2)$$

where ζ_s is the social significance coefficient; T is the design life of the structure; L is the average number of people inside the structure or in its immediate vicinity during the period for which the risk is assessed.

Considering that due to the presence of random errors, defects, and imperfections that may occur during the design, installation, and operation of a structure, it is proposed to relate the theoretical and actual probability of failure in a very simplified form by the ratio $[P_{fail}] = 0,1[P_{fail}]''$.

Then the required value of the theoretical probability of failure will take the form:

$$[P_{fail}] = \frac{10^{-5} \zeta_s T}{L}. \quad (3)$$

Simplified approaches are used to calculate the values of $P_{fail}(T_i)$:

- *1st level methods*, for which an acceptable reliability value is ensured by a certain number of partial

reliability coefficients introduced to the characteristic (standard) values of the initial quantities;

- *2nd level methods*, for which reliability is checked only at the point on the boundary of the failure region, and inequality is checked by comparing the reliability index.

Based on Level 1 methods, the paper proposes an algorithm for calculating numerical reliability indicators in the form of a safety characteristic β . The algorithm is implemented in the MATLAB programming language and consists of two main calculation blocks. The first block identifies the group of most critical elements, the failure of which is critical for the entire system and will inevitably lead to an avalanche-like collapse. For this purpose, a geometrically and structurally nonlinear calculation is performed, where, within the framework of one type of load, the system is gradually loaded with an additional load and the elements that have failed are recorded. The rods that no longer satisfy the strength conditions are recorded as the additional load increases and are transferred to the second calculation block.

The group of elements that failed in the first stage (sometimes the second stage is also taken into account, depending on the desired accuracy of the system analysis and the number of elements) is considered the most critical and is transferred to the second calculation block.

In the second calculation block, numerical reliability characteristics are calculated for the group of the most critical elements. The main characteristic is the failure range or safety characteristic. The geometric characteristics of the flat cross-sections of the elements, the strength characteristics of the material (yield strength of the material), wind load, snow load, and geometric parameters of the structure in the form of node coordinate deviations are considered as stochastic variables. The safety characteristic is calculated using the finite element method (FEM) in a probabilistic setting.

Using a random number generator, random variables are generated within the framework of predefined distribution laws. Based on the Monte Carlo method, the safety characteristics of the group of most critical elements are calculated.

The results of the calculations within the second calculation block are two values:

- $\beta_{\min}$ — the minimum value of the safety characteristic from the group of the most critical elements of the system;
- $\beta_{\max}$ — safety characteristics of the group of the most critical elements of the system operating in parallel.

These two values will determine the upper and lower limits of the reliability of the structure.

RESULTS OF THE RESEARCH

The proposed method for analyzing the system's susceptibility to avalanche-like collapse, as well as for calculating numerical indicators of structural reliability,

was tested on a U220-2+9 metal anchor-angle support in various operating modes.

Calculation situations for operating mode IIIk were considered:

- 1) end support;
- 2) broken wire providing the greatest torque to the support;
- 3) cable not broken.

The material of the structures is carbon steel for welded structures VSt3 according to GOST 380-71*, corresponding to C245. The elements of the sections are connected with bolts of normal accuracy class 5.6. The belts of adjacent sections are connected to each other with flanges on bolts of class 5.6.

The belts of the first three lower sections of the support are made of 200×16 mm angle iron, then the belt cross-section changes to 160×10 mm angle iron (upper section) (Fig. 1). The cable support belts are made of 80×6 mm angle iron. The cross-sections of the braces within one section are identical: the braces of the base

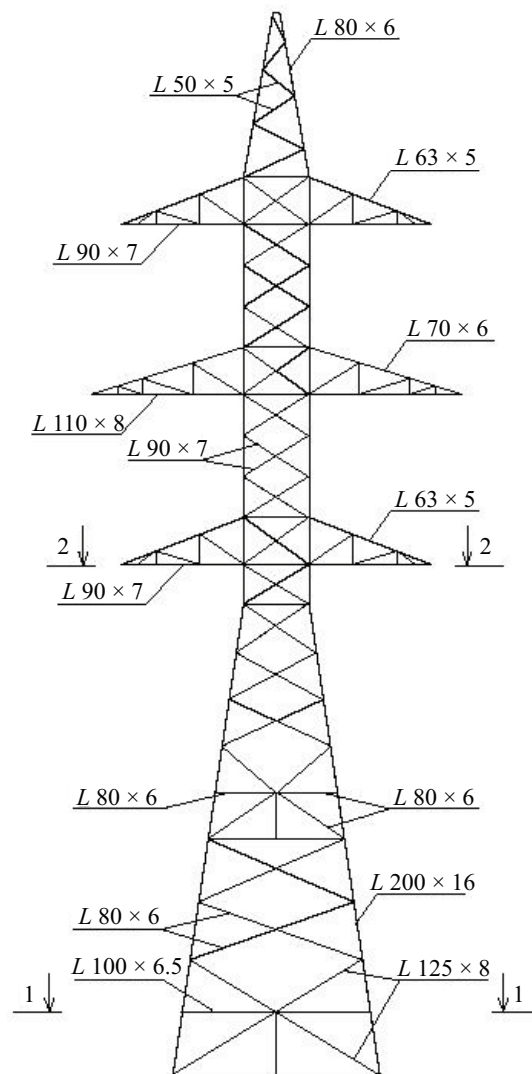


Fig. 1. Cross-sections of the main elements of the U220-2+9 support

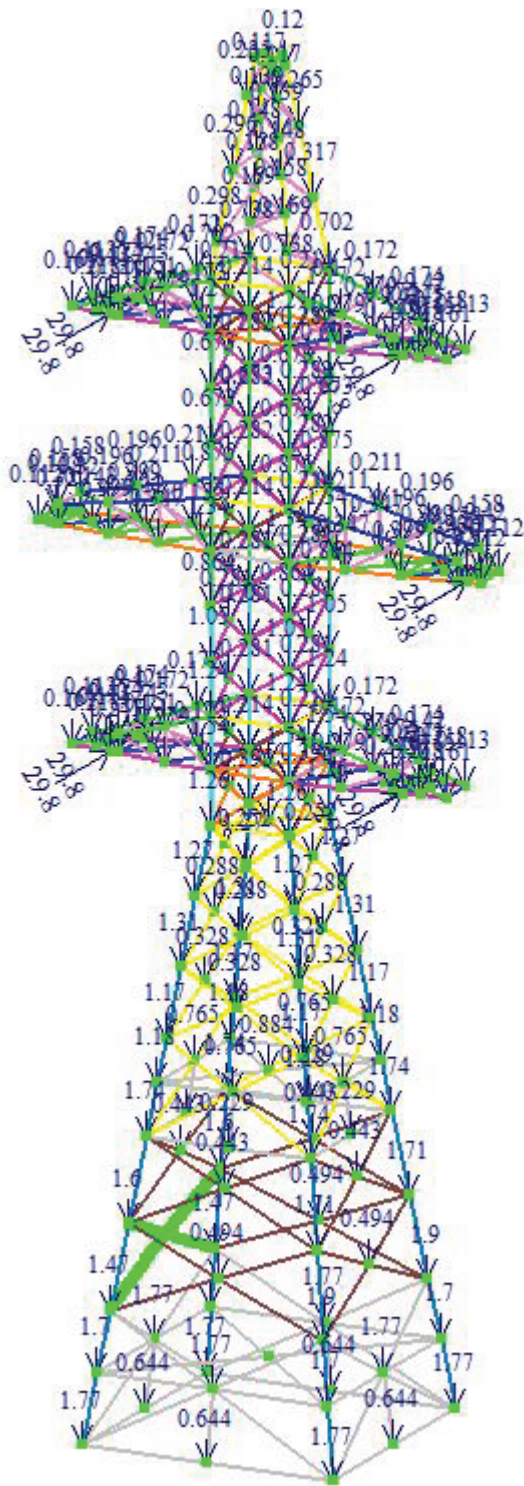
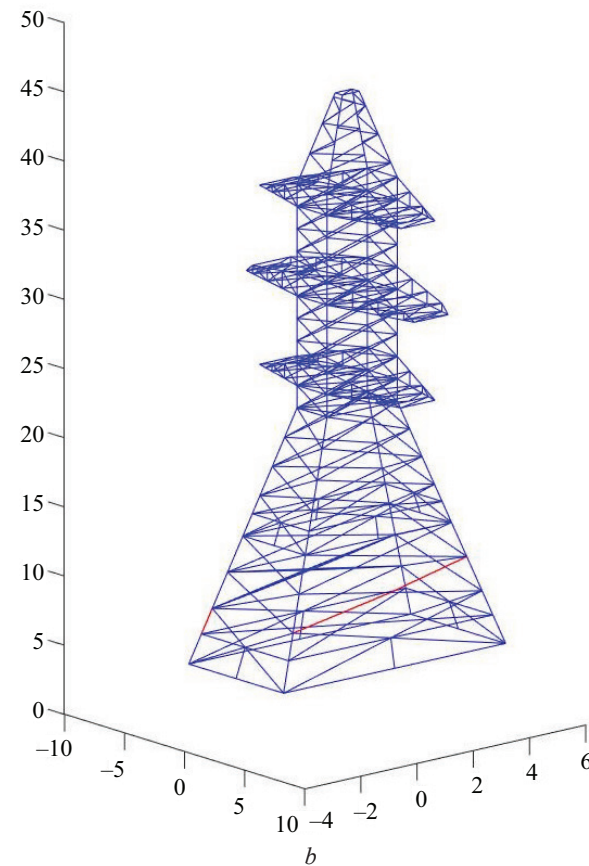
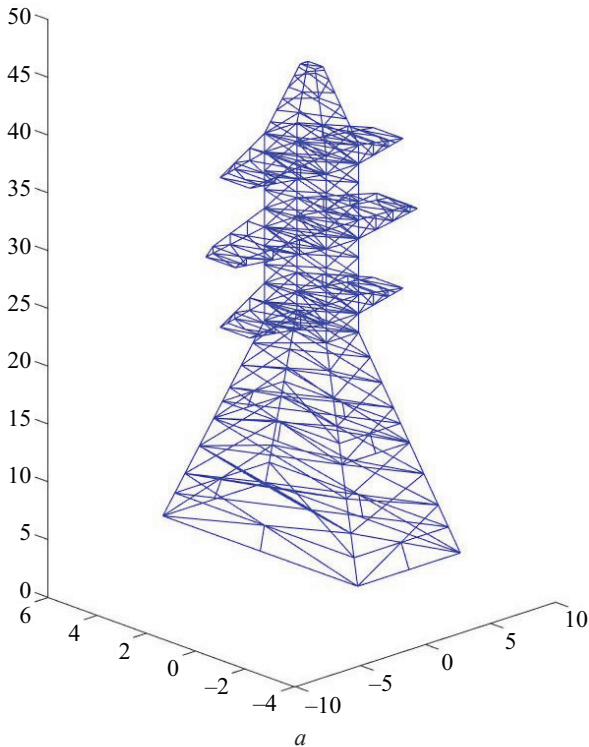


Fig. 2. Design diagram of the end support U220-2+9 for verification calculations in LIRA-CAD (first design situation)

are made of 125 × 8 mm angle iron, the braces of the first two lower sections are made of 80 × 6 mm angle iron, the braces of the upper sections are made of 90 × 7 mm angle iron, and the braces of the cable stand are made of 50 × 5 mm angle iron. The belts of the lower and upper crossbars are made of 90 × 7 mm angle iron, and the middle crossbar is made of 110 × 8 mm angle iron. The rods of the lower and upper crossbars

are made of 63 × 5 mm angle iron, and the middle crossbar is made of 70 × 6 mm angle iron. Diaphragms: lower sections — 100 × 6.5 mm angle bar, at the points of connection to the crossbars — 110 × 8 mm angle bar.

The following are considered as random variables: the dead weight of the structure, ice load [16], defects



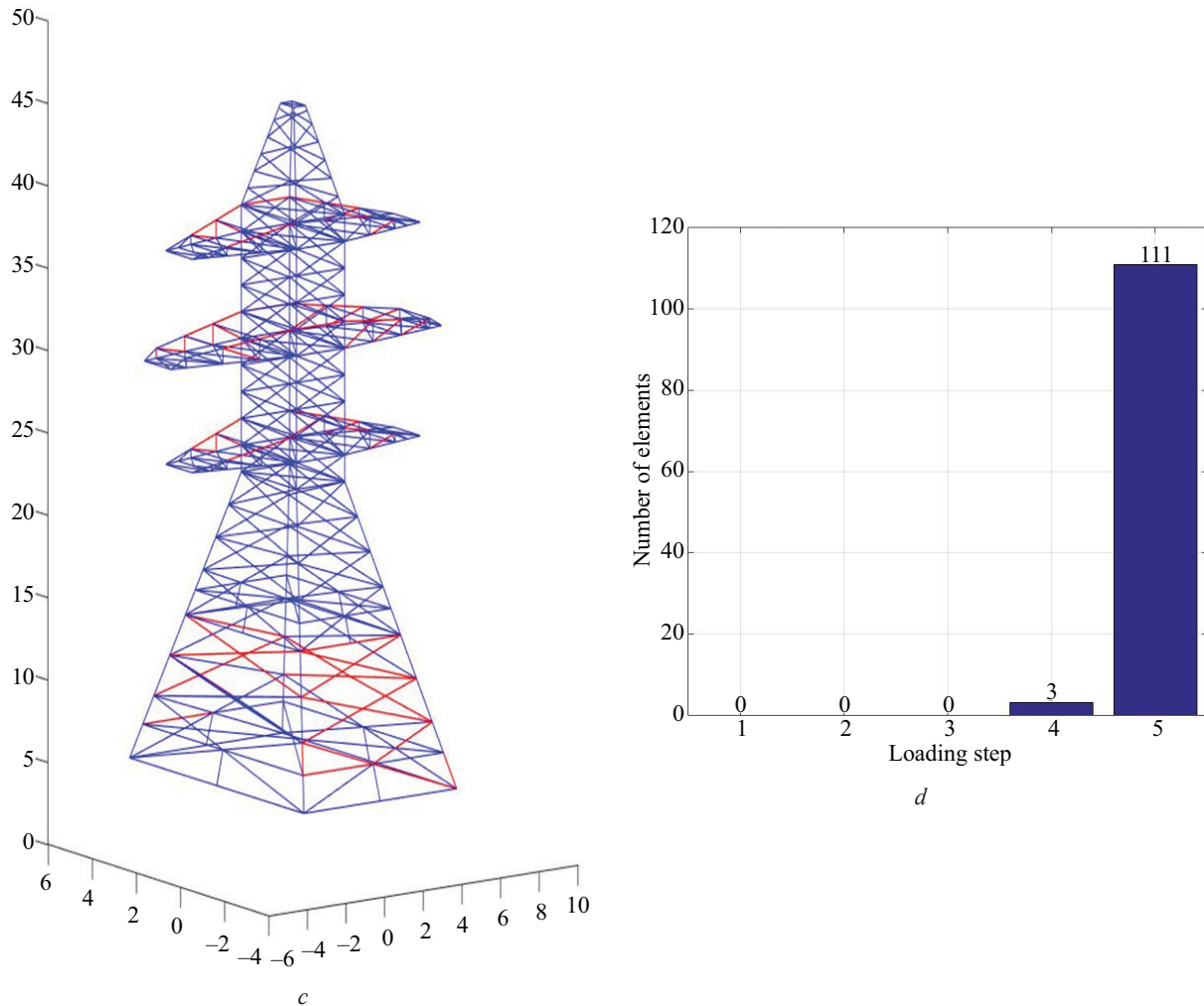


Fig. 3. Calculation of the U220-2+9 support (calculation situation 2): *a* — initial calculation diagram in MATLAB; *b* — 4th loading step, elements that have failed (3 pcs.); *c* — 5th loading step, elements that have failed (111 pcs.); *d* — graph of element failure during loading of the structure with a temporary load

in the geometry of the structure [17], and the strength properties of the material (yield strength or conditional yield strength).

The design diagram of the support (functioning as an end support), created in the LIRA-CAD software package for verification calculations, is shown in Fig. 2. The graphical data for the first and second design situations are similar and are shown in Fig. 3 for the second design situation. Information on the third design situation is presented in Fig. 4.

The results of the numerical experiment are shown in Table 1.

Analyzing the data obtained, it can be said that at maximum loads on the support (third design situation), the safety characteristic does not correspond to the minimum recommended standard value.

At the same time, for the third design situation, there is a clear tendency for the structure to undergo progressive failure, with the failure of elements beginning already at the second stage of loading, and avalanche-like failure of the structure observed at the third stage (Fig. 4, *b*).

To ensure the required minimum standard safety characteristic β_{min} , we will increase the cross-section of the elements shown in Fig. 4, *a* (20 rods) by one size and recalculate the structure.

The calculation results are shown in Table 2 (3.1 — initial parameters, 3.2 — parameters of the support with increased cross-sections of elements).

Analyzing the results obtained, it should be noted that the reliability characteristic after increasing the cross-sections of the 20 most critical elements of the system was 4.75, which exceeds the recommended minimum value by 0.05.

The tendency of the support under consideration to avalanche-like collapse decreased, as the number of reloading steps before the elements began to fail increased by one.

Thus, by reasonably determining the group of the most critical structural elements and increasing their cross-sections, the recommended level of system reliability is ensured. At the same time, the weight of the support increased non-critically from 16.294 to 17.02 tonnes, which amounted to 4.46 %.

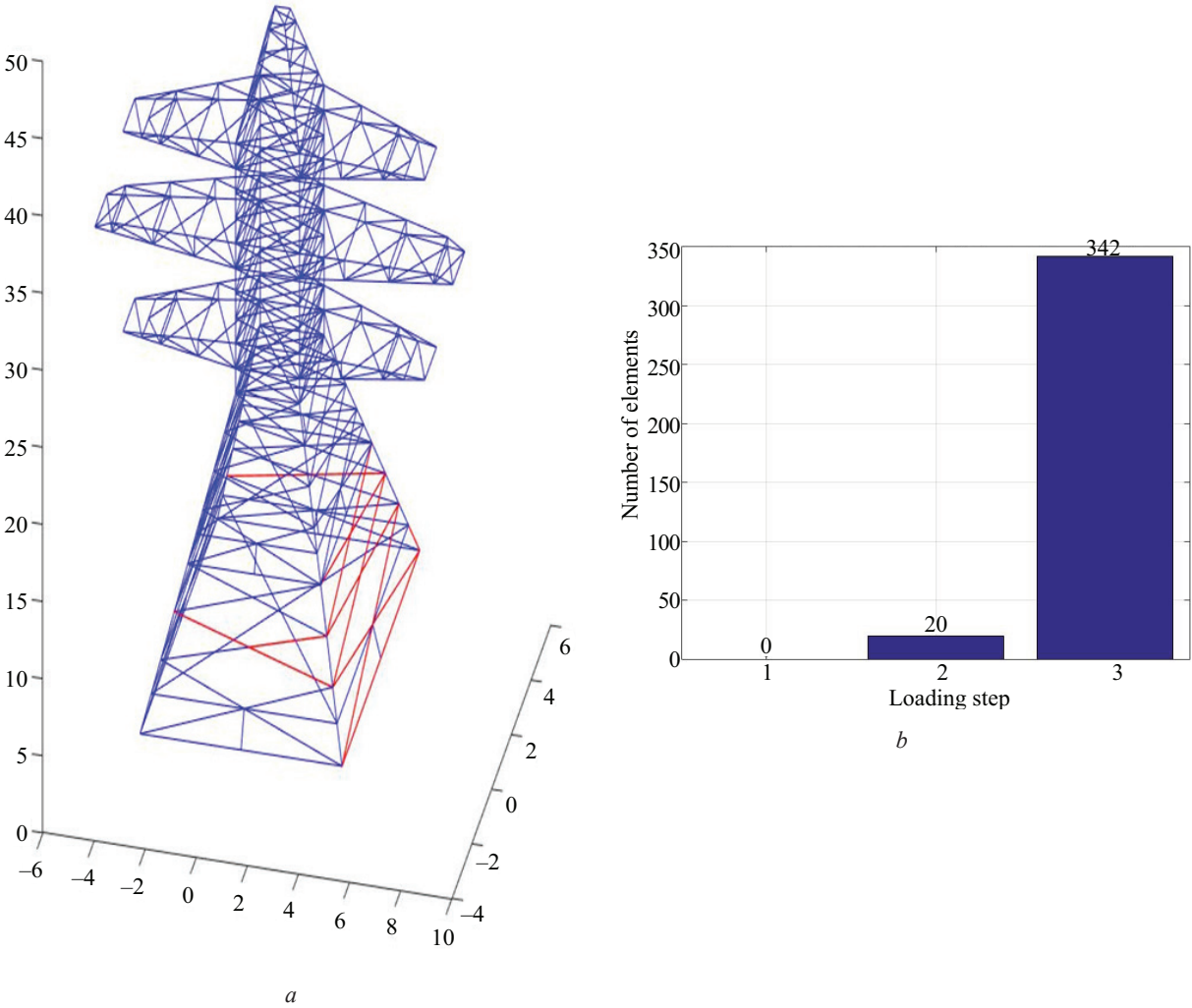


Fig. 4. Calculation of support U220-2+9 (calculation situation 3): *a* — 4th loading step, elements that have failed (20 pcs.); *b* — graph of element failure during loading of the structure with a temporary load

Table 1. Results of numerical determination of the reliability of support U220-2+9

Calculation scenario number	Number of most critical elements	Number of loading steps	$\beta_{\min}$	$\beta_{\max}$	GOST R ISO 2394–2016 β
1	3	4	9.32	13.95	4.7
2	3	4	6.00	15.17	
3	20	2	3.21	9.08	

Table 2. Selection of the cross-section of support elements U220-2+9 taking into account the recommendations of GOST R ISO 2394–2016

Calculation scenario number	Number of most critical elements	Number of loading steps	$\beta_{\min}$	$\beta_{\max}$	Structure weight, t
3.1	20	2	3.21	9.08	16.294
3.2	8	3	4.75	11.05	17.02

CONCLUSION AND DISCUSSION

A method has been developed for analyzing the susceptibility of steel rod structures of power line supports to avalanche-like collapse, which allows the most dangerous elements of the system to be identified for a specific type of load. The set of such rods is determined on the basis of a well-founded numerical calculation. The calculation is performed on the basis of FEM in a geometrically and structurally nonlinear setting.

A method for calculating the reliability characteristics of steel rod power line supports is proposed. It is proposed to use the failure range (safety characteristic) β as the key reliability characteristic. In this case, the desired value of this characteristic will be between the lower reliability limit $\beta_{\min}$ (characteristic of one of the most critical elements of the system) and the upper limit $\beta_{\max}$ (characteristic for a group of the most critical elements of the system), determined during

the analysis of the structure for susceptibility to avalanche-like collapse.

The proposed methods have been tested on a metal anchor-corner support U220-2+9 in various operating modes. In the mode with the highest loads, the safety characteristic value ($\beta_{\min} = 3.21$) was less than the GOST recommendation ($\beta_{\text{norm}} = 4.7$). After increasing the cross-sections of the group of the most critical elements (20 rods) and re-determining the reliability characteristic, it exceeded the minimum recommended level and amounted to $\beta_{\min} = 4.75$. The weight of the structure increased by only 4.46 % from 16.294 to 17.02 tonnes.

The developed methods allow identifying the “weak spots” of transmission line pole supports and increasing the cross-sections of elements in order to ensure the recommended level of reliability for a reasonable number of specific poles. This makes it possible to significantly reduce the metal capacity of the support while ensuring the recommended level of system reliability at the design stage.

REFERENCES

1. 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.).
2. Barmotin A., Dmitrenko E., Volkov A., Mashtaler S., Nedorezov A., Kazak K. et al. Information modeling when performing building surveys. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2024; 20(2):93-109. EDN WFDUZE. (rus.).
3. Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Tseplyaev M.N., Mushchanov A.V. An integrated approach to reliability assessment of spatial metal structures. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(1):6-23. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.1. EDN WGPYND. (rus.).
4. Mushchanov V., Orzhehovskiy A., Kashchenko M., Zubenko A. Reliability of spatial core structures of truncated large-span domes. *Metall Constructions*. 2023; 29(1):47-61. EDN RWVBHA. (rus.).
5. Mushchanov V.F., Orzhehovskiy A.N., Kashchenko M.P., Dudov N.V. Ensuring a regulated level of reliability of a high-responsibility steel core structure using the example of the coating of the Ilyichevets ic in Mariupol. *Metall Constructions*. 2025; 31(1):35-46. DOI: 10.71536/mc.2025.v31n1.4. EDN ICQFZG. (rus.).
6. Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(5):763-777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777. EDN GEAKOH. (rus.).
7. Smirnova N.S. *Optimization of reconstruction of overhead power lines taking into account the reliability of power supply to consumers*. Makeevka, 2023; 187. (rus.).
8. 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.).
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. Arsalan H., Zeashan H., Qi 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
11. Golikov A., Gubanov V., Garanzha I. Atypical structural systems for mobile communication towers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365(5):052010. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052010
12. Fu X., Li H.N., Li G., Dong Z.Q., Zhao M. Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity. *Engineering Structures*. 2021; 233:111913. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111913
13. Fu X., Wang J., Li H.N., Li J.X., Yang L.D. Full-scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission tower under Extreme Wind Loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019; 190:119-133. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.04.011

14. Filimonov A.S. Proposals for the protection of intermediate support of 750 kV overhead power line with guy wires from progressive collapse. *Series "Construction" : collection of articles by master's and postgraduate students*. 2021; 391-398. EDN LNFUUV. (rus.).

15. 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.).

16. 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/REEPE-51337.2021.9388054

17. Garanzha I.M., Tanasoglo A.V., Ademola H.A., Pisareva M.M. Dynamic behavior of power transmission line supports under wind influence. *Magazine of Civil Engineering*. 2025; 18(1):13301. DOI: 10.34910/MCE.133.1

Received May 13, 2025.

Adopted in revised form on May 16, 2025.

Approved for publication on May 16, 2025.

B I O N O T E S: **Anatoliy N. Orzhehovskiy** — 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;

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;

Vladimir F. Mushchanov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Vice-Rector for Research; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture**; 22 Derzhavina st., Makeevka, 86123, DPR, Russian Federation; SPIN-code: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Natalia S. Smirnova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Structures and Facilities; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture**; 22 Derzhavina st., Makeevka, 86123, DPR, Russian Federation; Scopus: 59175404500, ResearcherID: NHP-9779-2025, ORCID: 0009-0009-0589-1686; n.s.smirnova@donnasa.ru.

Contribution of the authors:

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

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.

Vladimir F. Mushchanov — idea, research concept, writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

Natalia S. Smirnova — writing of the article, data gathering and processing, scientific editing of the text, conclusions.

The authors declare that they have no conflict of interest.