



(23)-0400-1

АНАЛИЗ ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИИ АНКЕРНО-УГЛОВОЙ ОПОРЫ 220 КВ С НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Е. В. Горохов¹, Н. С. Смирнова², А. Н. Оржеховский³

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика,
286128, г. о. Макеевка, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.

E-mail: ¹mk@donnasa.ru, ²n.s.smirnova@donnasa.ru, ³a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru

Получена 02 ноября 2023; принята 24 ноября 2023.

Аннотация. В данной работе показана необходимость учета живучести конструкции на примере анкерно-угловой опоры У220-2+9 воздушной линии (ВЛ), которая рассматривается как пространственная многократно статически неопределимая сквозная система. Для сравнения показателей живучести были смоделированы опоры с образованием общего искривления элементов решетки из плоскости грани опоры на сжатый и растянутый элементы поочередно, анализировался отклик системы на элементы с несовершенствами. Расчёт выполняется в авторском программном комплексе, который реализован на языке программирования MATLAB с возможностью переноса данных в систему для автоматизированного расчета ЛИРА САПР по средствам выходного текстового файла. На основании анализа работы системы с несовершенствами удалось выявить порядок выхода их строя элементов, группу наиболее ответственных элементов, которые определяют надежность системы в целом.

Ключевые слова: анкерно-угловая опора, воздушная линия электропередачи, напряженно-деформированное состояние, расчет надежности, живучесть, численные исследования, работа конструкций с несовершенствами.

ANALYSIS OF THE SURVIVABILITY OF THE 220 KV ANCHOR- ANGULAR SUPPORT STRUCTURE WITH IMPERFECTIONS UNDER THE ACTION OF STATIC LOADS

Yevgen Gorokhov¹, Natalia Smirnova², Anatoly Orzhekhovskiy³

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,
Russian Federation, 286128, Makeevka, Derzhavin st., 2.

E-mail: ¹mk@donnasa.ru, ²n.s.smirnova@donnasa.ru, ³a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru

Received 02 November 2023; accepted 24 November 2023.

Abstract. This paper shows the need to take into account the survivability of the structure using the example of the anchor-angular support U220-2+9 overhead line (overhead line), which is considered as a spatial repeatedly statically indeterminate through system. To compare the survivability indicators, supports were modeled with the formation of a general curvature of the lattice elements from the plane of the support face to the compressed and stretched elements alternately, the response of the system to elements with imperfections was analyzed. The calculation is performed in the author's software package, which is implemented in the MATLAB programming language with the ability to transfer data to the system for automated calculation



of CAD LIRA by means of an output text file. Based on the analysis of the operation of the system with imperfections, it was possible to identify the order of failure of their elements, a group of the most important elements that determine the reliability of the system as a whole.

Keywords: anchor-angular support, overhead power line, stress-strain state, reliability calculation, survivability, numerical studies, operation of structures with imperfections.

Введение

Современное понимание надежности строительных конструкций рассматривает их как сложные системы, состоящие из взаимосвязанных элементов. Эти элементы могут быть самостоятельными конструктивными блоками или их частями, подверженными потенциальным отказам [5]. Параметры системы, определяющие ее состояние, содержат в себе элементы неопределенности и включают в себя входные параметры, параметры самой системы и параметры ее реакции [5, 8, 14]. Внешние нагрузки и воздействия являются входными параметрами, геометрические размеры и физико-механические характеристики материалов – параметрами системы. Параметры реакции отражают ответ системы на воздействия, включая перемещения, усилия, напряжения, дефекты, повреждения и прочее [15]. Основная задача при расчете надежности заключается в определении вероятностных характеристик реакции системы при известных вероятностях входных параметров и параметров самой системы [12, 13].

С применением компьютерных вычислительных систем в инженерном проектировании, появилась возможность отойти от традиционных методов расчета усилий в элементах сложных трехмерных систем. Трехмерное моделирование и анализ всей системы в целом, а не упрощенный расчет отдельных компонентов, позволяет учитывать перераспределение нагрузок в элементах, включая те, которые имеют дефекты близкие или равные к критическим значениям (потеря несущей способности), определять уровень безопасности структуры в целом [3, 8].

Цель исследования

Целью работы является исследование поведения решетчатых конструкций опор ВЛ с несовершенством в виде искривления элементов решетки из плоскости грани опоры, определение характеристики безопасности конструкции в целом при учете указанного дефекта.

Основная часть

Основные принципы расчета надежности. Нормы проектирования, основанные на теории надежности, ставят своей целью достижение определенной вероятности того, что разрабатываемая конструкция будет пригодной для использования в течение определенного периода, учитывая ее расчетный срок службы [1]:

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

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, то есть 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 определения вероятности отказа конструкции, вызванного любой причиной в течение ее расчетного срока службы $[P_{fail}]^n$, предложено определять, как

$$[P_{fail}]^n = \frac{10^{-4} \zeta_s T}{L}, \quad (2)$$

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.

При этом, 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:

$$[P_{fail}] = 0,1 [P_{fail}]^n.$$

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.

В качестве основных регламентируемых положений отмечается следующее:

- вероятность наступления отказа трактуется как вероятность выполнения неравенства:

$$P_{f,i}(T_{ef}) = Prob\{g_i(\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_n) < 0 / T_{ef}\} \leq P_i^e, \quad (4)$$

где P_f – вероятность отказа;

T_{ef} – установленный срок эксплуатации;

g_i – функция работоспособности относительно отказа i -го вида;

$\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_n$ – случайные параметры, учитывающие случайные значения параметров влияний (нагрузок), прочностных характеристик, геометрических характеристик, времени и др.; P_i^{ex} – целесообразное значение вероятности отказа i -го вида, которое изменяется в пределах от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$.

С другой стороны надежность работы конструкции оценивается через дальность отказа β , которая связана с вероятностью отказа P_f соотношением:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f); \quad (5)$$

где $\Phi(z)$ – функция нормированного распределения вероятностей работоспособности g_i .

При использовании в расчетах нормального распределения вероятностей функция $\Phi(z)$ может быть определена через интеграл вероятностей:

$$\Phi(z) = 0,5\pi^{-1} \int_{-\infty}^z \exp[-u^2/2] du. \quad (6)$$

Если надежность работы конструкции оценивается через дальность отказа β , то необходимо добиваться выполнения условия:

$$\beta_i \geq \beta_i^{ex}, \quad (7)$$

где β_i^{ex} – значение вероятности отказа i -го вида, изменяющееся от 4,76 до 3,29.

Следует заметить, что в случаях, когда распределения вероятностей случайных параметров функции работоспособности g_i с достаточной обоснованностью могут быть приняты в виде нормального распределения, то возможным является использование *метода 2-х моментов*.

Статистические характеристики нагрузок и параметры несущей способности (деформативности), которые применяются в вероятностных расчетах, задаются в нормах нагрузок и влияний и в нормах проектирования конструкций.

К этим характеристикам относятся:

- для параметра i -го влияния F_i – соответствующее среднее значение и стандарт \bar{S}_i, \bar{S}_i ;
- для j -го параметра несущей способности (деформативности) f_j – соответственно среднее значение и стандарт \bar{r}_j, \bar{r}_j .

В случаях, когда расчет выполняется с учетом фактора времени, то также дополнительно рассматриваются:

- эффективная частота i -го влияния ω_i ,
- коэффициент тренда K_i^{TP} , учитывающего сезонные изменения i -го влияния (например, снеговой и ветровой нагрузок).

Для S и R статистическими характеристиками являются следующие параметры:

а) *средние значения*:

$$\bar{s} = S(F_{d1}, \dots, F_{dn}) + \sum_{i=1}^n a_i(\bar{F}_i - F_{di}), \quad (8)$$

$$\bar{r} = R(f_{d1}, \dots, f_{dm}) + \sum_{j=1}^m b_j(\bar{f}_j - f_{dj}), \quad (9)$$

где F_{di} и f_{dj} – расчетные значения величин;

$a_i = \partial S / \partial F_i$ ($i = 1, \dots, n$), $b_j = \partial R / \partial f_j$ ($j = 1, \dots, m$) – коэффициенты чувствительности;

б) *стандарты*:

$$\bar{s} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \bar{s}_i)^2} \bar{r} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (b_j \bar{r}_j)^2}, \quad (10)$$

в) *коэффициенты вариации*:

$$v_s^0 = \bar{s} / \bar{s} v_r^0 = \bar{r} / \bar{r}, \quad (11)$$

Вероятность наступления отказа $P_{f,i}(T_{ef})$ сравнивается с целесообразной вероятностью наступления отказа P_i^{ex} .

Настоящая работа посвящена разработке метода оценки надежности электросетевых конструкций, испытывающих воздействия комплекса случайных факторов.

Практически во всех задачах проектирования строительных конструкций применяется схема раздельного анализа входных параметров и параметров системы. Ей соответствует полувариантный метод расчета по предельным состояниям.

Считается, что конструкция оказывается в предельном состоянии, когда определенный параметр реакции системы достигает порогового значения. Такое состояние трактуется как отказ системы. Для каждого вида предельного состояния формулируется предельное неравенство.

Вероятность безотказной работы системы P_f выражается как вероятность выполнения неравенства:

$$P_f = P\{S = R - Q > 0\}, \quad (12)$$

где S – запас прочности;

R – обобщенная характеристика сопротивления;

Q – обобщенная характеристика эффекта нагрузки.

В общем случае R и Q являются нелинейными многомерными функциями всей совокупности случайных входных параметров и параметров системы. Вследствие изменчивости этих параметров во времени R , Q и S имеют одним из своих аргументов время.

Таким образом, запас прочности может быть формально определен как композиционная функция случайных аргументов. А вероятность безотказной работы равна вероятности превышения запасом прочности нулевого уровня на всем рассматриваемом временном интервале.

Причем выполнение предельного неравенства $S > 0$ целесообразно проверять только для наилучших возможных условий (макимальных внешних воздействий и т. п.):

$$P_f = P\{S_{\min}(t) > 0, t \in [0; T]\}. \quad (13)$$

Надежность конструкции (системы высшего уровня) оценивается на основании надежности ее отдельных элементов и узлов (систем нижнего уровня).

В качестве показателя надежности элемента принята вероятность безотказной работы.

Метод основан на следующих расчетных предпосылках:

- элемент может находиться только в двух состояниях: отказ и безотказная работа;
- отказ элемента наступает при превышении напряжением в элементе σ сопротивления материала элемента R ;
- рассматривается только один (наиболее вероятный для данного стержня) механизм отказа;
- напряжения в элементе однозначно определены как функции нагрузок;
- напряжения в элементе и сопротивление материала элемента являются стохастически независимыми;
- усилия и напряжения в пределах изменения внешних нагрузок линейно зависят от нагрузки (это вовсе не означает, что усилия в элементах следует определять без учета геометрической нелинейности конструкции).

Учитывая второй пункт уравнение предельного состояния можно записать в виде:

$$g(x) = R - \sigma, \quad (14)$$

Причем безотказной работе конструкции соответствует условие $R - \sigma \geq 0$.

Таким образом, надежность элемента конструкции определяется как вероятностью того, что напряжение в нем не превысит сопротивление материала при всех возможных сочетаниях σ и R с учетом частоты их появления в течение заданного срока службы конструкции.

Поток отказов опор воздушных линий (ВЛ), не связанных с функцией времени (коррозионный износ), не зависит от длительности эксплуатации, т. е. определяется случайными величинами и может быть уменьшен только увеличением первоначальных прочностных параметров конструкции, а также качеством строительного производства и монтажа.

Учитывая вышесказанное, возникает необходимость в определении влияния несовершенства элемента на напряженно-деформированное состояние (НДС) всей конструкции либо ее части и способность конструкции к локализации и перераспределению усилий между элементами.

В настоящее время треть эксплуатируемых опор ВЛ изготовлены по типовым альбомам СССР с максимальной унификацией элементов.

Наиболее уязвимыми элементами, в которых возникают несовершенства, являются те, которые имеют наибольшие параметры дефекта и воспринимают наибольшие усилия от воздействий на них параметров нагрузок.

Поэтому для выявления зависимости влияния несовершенств были проведены численные исследования башенной анкерно-угловой опоры У220-2+9 в программном комплексе разработанном на основе языка программирования MATLAB.

Объект исследования. В качестве объекта исследования принята башенная свободностоящая решетчатая анкерно-угловая опора типа У220-2+9 с крестовой решеткой из одиночных равнополочных уголков (рис. 2).

Высота опоры 40,6 м – рис. 1.

Опора представляет собой пространственную стержневую конструкцию (рис. 3).

В пределах первых двух нижних секций опора имеет вид правильной четырехгранной пирамиды. Высота каждой секции составляет 9 м.

Верхняя секция опоры представляет собой параллелепипед шириной 2,5 м и высотой 16,2 м с примыкающими к ней в трех уровнях шестью параллельными траверсами, имеющими пространственную стержневую конструкцию.

Вылет траверс симметричен относительно ствола и составляет 4,65 м для нижних и верхних траверс и 5,815 м – для средних траверс.

Элементы секций соединяются между собой на болтах нормальной точности классом 5.6. Пояса смежных секций соединены между собой накладками на болтах класса 5.6.

Пояса первых трех снизу секций опоры выполнены из уголка 200×16 мм. Сечение поясов верхней секции изменяется на уголки 160×10 мм. 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 секции выполнены из уголка 80×6 мм, раскосы верхних секций – уголок 90×7 мм, раскосы тросостойки – 50×5 мм. Пояса нижних и верхних траверс – уголок 90×7 мм, средней траверсы – уголок 110×8 мм. Тяжи 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.

Материал конструкций – малоуглеродистые стали для сварных конструкций ВСт3 по ГОСТ 380-71*, соответствуют марке С245 по табл. 50 [11].

Элементы секций соединяются между собой на болтах нормальной точности классом 5.6. Пояса смежных секций соединены между собой накладками на болтах класса 5.6.

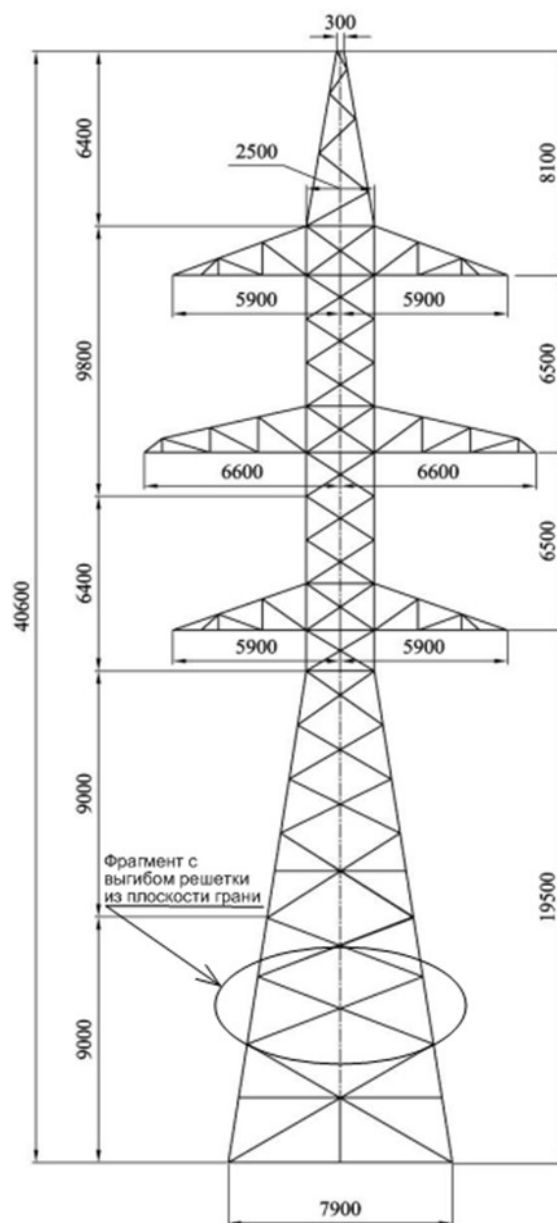


Рисунок 1. Геометрическая схема опоры У220-2+9.

Тросостойка представляет собой стержневую конструкцию в виде четырехгранной пирамиды высотой 6,4 м.

Опора запроектирована на нагрузки для региона Донбасса (3 ветровой и 4 район по гололеду).

Анализ живучести конструктивной схемы опоры ВЛ. С целью проведения анализа живучести стержневой конструктивной формы опоры линии электропередачи выполнен расчет в программном комплексе, разработанном на основе языка программирования MATLAB [12],

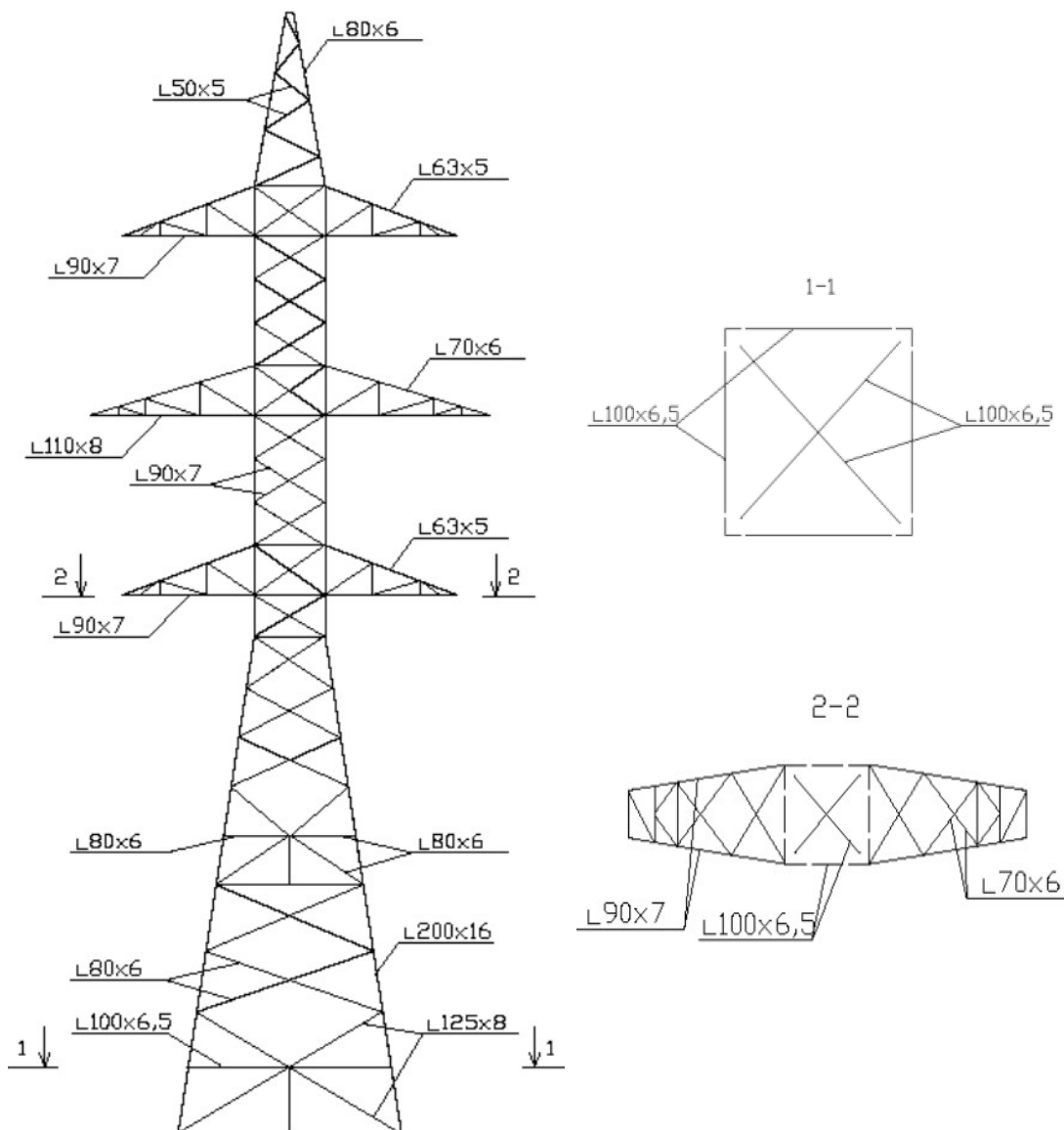


Рисунок 2. Сечения основных элементов опоры У220-2+9.

по результатам которого определяется и фиксируется группа разрушенных элементов, определяющих верхнюю границу надежности конструкции в целом.

С целью определения порядка выхода из строя элементов конструкции выполняется поэтапный численный расчет.

С точки зрения строительной механики, рассматриваемая конструкция опоры ВЛ является пространственной статически неопределимой системой. Требуется определить группу наиболее ответственных элементов, надёжность которых и будет определять надёжность системы в целом.

В случае если ни один элемент не разрушается, временная нагрузка увеличивается этапами по 0,5 кН и выполняется перерасчет.

После дополнительного догружения во всех рассмотренных вариантах, начинается лавинообразное разрушение.

Далее, на определенном шаге, система опять стабилизируется и требуется следующий этап дополнительного приращения нагрузки.

Второй этап лавинообразного обрушения для вариантов 2, 7, 8 приводит к полному разрушению конструкции, а для остальных вариантов, фиксируются промежуточные этапы стабилизации системы.

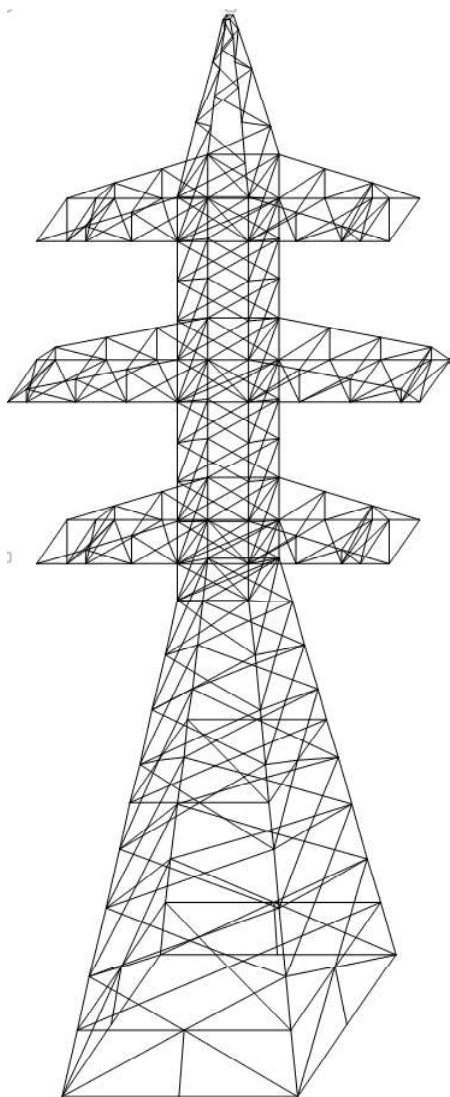


Рисунок 3. Пространственная стержневая модель опоры У220-2+9.

После получения порядка выхода из строя элементов определяется группа стержней, для которой будут насчитываться характеристики надежности, в частности вероятность отказа и β – характеристика безопасности. Таким образом, выбирается группа из 5–7 стержней, которая и будет определять надежность системы в целом (рис. 4–5).

В качестве случайных величин рассматривались:

- толщины полок уголков ($\pm 4\%$);
- длины полок ($\pm 4\%$);
- координаты узловых точек (\pm до 18 мм);
- осадка опорных точек (до 20 мм);
- расчётное сопротивление ($\pm 20\%$).

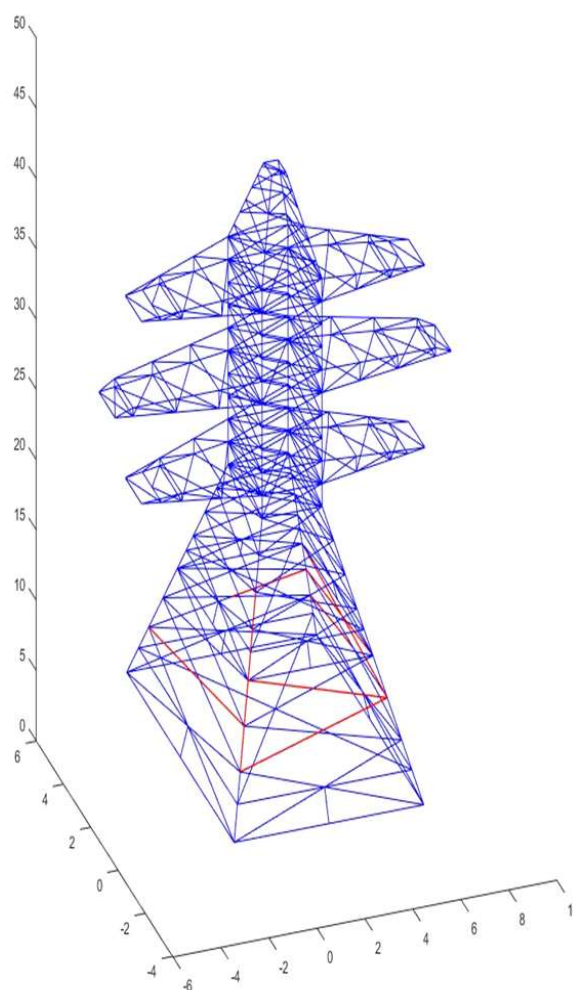


Рисунок 4. Количество элементов, выходящих из строя на четвертом догружении (с выгибом решетки на сжатый элемент).

Все вышеперечисленные стохастические величины подчиняются нормальному закону распределения с обеспеченностью не менее 0,05.

Далее, оперируя плотностью, законами и характеристиками распределений, вычисляются вероятности отказа и характеристика безопасности (дальность отказа) для каждого из выбранных элементов в группе.

Максимальное значение вероятности отказа является нижней границей надежности. Вероятность отказа определяется методом Монте-Карло [13].

Как видно из приведенных гистограмм разрушения конструкции (рис. 6), на определенном этапе дополнительного догружения временной

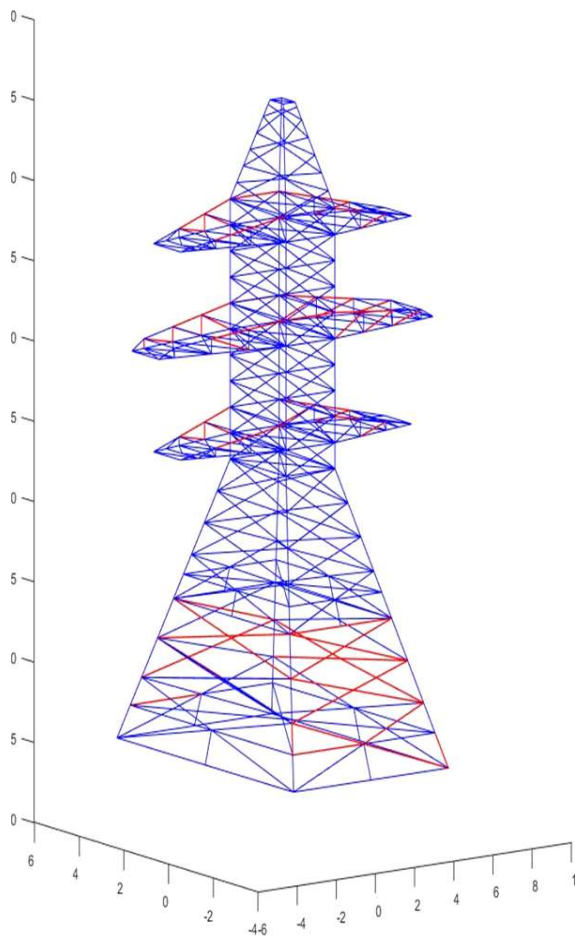


Рисунок 5. Количество элементов, выходящих из строя на четвертом догрузении (с выгибом решетки на растянутый элемент).

нагрузкой происходит выход группы элементов из строя. При этом в конструкции перераспределяются усилия, система стабилизируется и снова догружается дополнительной нагрузкой.

По результатам расчета в программном комплексе было установлено, что характеристика безопасности для опоры с дефектом решетки в виде выгиба на сжатый элемент составляет $-9,32$, в виде выгиба на растянутый элемент составляет $-6,0$.

Выводы

1. Выполнены численные исследования разработанных моделей опоры ВЛ с несовершенствами в виде выгибов решетки из плоскости грани.
2. В результате анализа расчетов определено включение в работу панелей, перпендикулярных граням с выгибами, в результате перераспределения усилий в элементах решетки пространственной модели в отличие от типового расчета, когда конструкция раскладывается на плоские фермы, рассчитываемые по отдельности.
3. По результатам расчета в программном комплексе было установлено, что характеристика безопасности для опоры с дефектом решетки в виде выгиба на сжатый элемент составляет $-9,32$, в виде выгиба на растянутый элемент составляет $-6,0$.

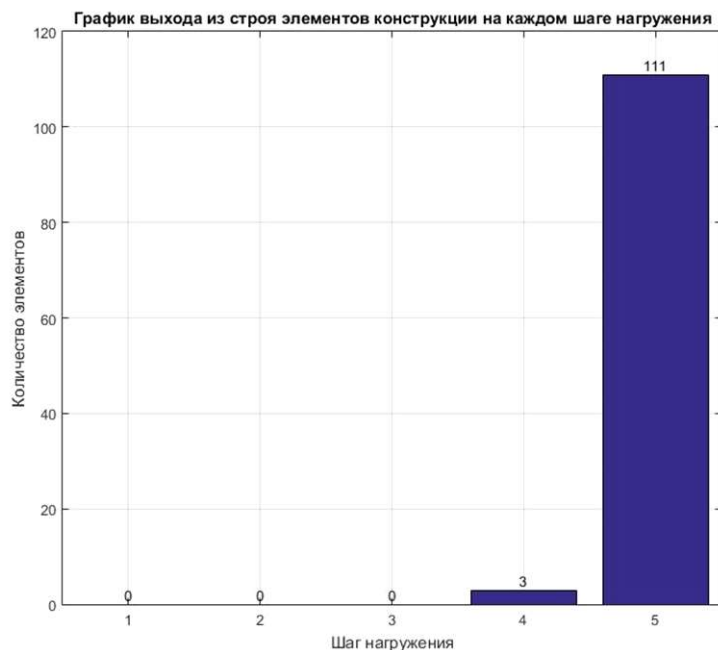


Рисунок 6. График выхода из строя элементов конструкции в зависимости от шага нагружения.

Литература

1. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные требования = Reliability of building structures and foundations : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно исследовательский центр «Строительство» (ОАО «НИЦ «Строительство»), Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В. А. Кучеренко. – Москва : Стандартиформ, 2015. – Текст : непосредственный.
2. Аэродинамика электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим. ; под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк, 2000. – 336 с. – Текст : непосредственный.
3. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи : монография / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим ; под редакцией Е. В. Горохова. – Донецк, 2005. – 348 с. – Текст : непосредственный.
4. Расчет башенной опоры воздушной линии электропередачи как пространственной шарнирно-стержневой системы / Е. В. Шевченко, В. А. Глухов, Ю. В. Сапронов [и др.]. – Текст : непосредственный // Будівництво України. – 2000. – № 1–2000. – С. 41–44.
5. Шевченко, Е. В. Исследование напряженно-деформированного состояния двухцепной анкерно-угловой опоры ВЛ 330 кВ с использованием различных программных комплексов / Е. В. Шевченко, В. А. Глухов, А. В. Танасогло. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 2010. – Том 16, № 1. – С. 31–39.
6. Правила влаштування електроустановок. Глава 2.5 «Повітряні лінії електропередачі напругою вище 1 кВ до 750 кВ» : офіційне видання : затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 22.08.14 № 596 : введено в дію 22.08.14. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ», 2006. – 125 с. – Текст : непосредственный.
7. IEC 60652 (2021). Overhead line structures. Loading tests : International standard = МЭК 60652 (2021). Опоры воздушных линий электропередачи. Испытания механическими нагрузками : Supersedes IEC 60652 (2002) : This International Standard was approved by July 30, 2021 / developer IEC. – Geneva, Switzerland : [s. n.], 2021. – 26 с. – Текст : непосредственный.
8. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1971. – 248 с. – Текст : непосредственный.
9. Бронштейн, Э. И. Аварийность воздушных линий электропередачи напряжением 35–220 кВ /

References

1. GOST 27751-2014. Reliability of building structures and foundations : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 11, 2014 № 1974-st : introduced for the first time : introduction date 2015-07-01 / developed by Open Joint Stock Society «Scientific Research Center «Construction» (JSC «National Research Center «Construction»), Central Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko. – Moscow : Standartinform, 2015. – Text : direct. (in Russian)
2. Gorokhov, E. V.; Kazakevich, M. I.; Shapovalov, S. N. [et al.] ; edited by Ye. V. Gorokhov, M. I. Kazakevich. Aerodynamics of electrical grid structures : monograph. – Donetsk, 2000. – 336 p. – Text : direct. (in Russian)
3. Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V. [et al.] ; edited by Ye. V. Gorokhov. Wind and ice forming influence on over-head transmission lines : monograph. – Donetsk, 2005. – 348 p. – Text : direct. (in Russian)
4. Shevchenko, E. V.; Glukhov, V. A.; Sapronov, Yu. V. [et al.]. Calculation of a tower support for an overhead power transmission line as a spatial hinge-rod system. – Text : direct. – In: *Construction of Ukraine*. – 2000. – № 1-2000. – P. 41–44. (in Russian)
5. Shevchenko, Ye. V.; Glukhov, V. A.; Tanasoglo, A. V. Study of a mode of deformation of a double circuit corner dead end support VL 330 kV using different software packages. – Text : direct. – In: *Metal Constructions*. – 2010. – Volume 16, № 1. – P. 31–39. (in Russian)
6. Rules for electrical installations. Chapter 2.5 «Overhead power lines with voltages above 1 kV to 750 kV» : official publication : approved by order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated 22.08.14 № 596 : put into effect on 22.08.14. – Kyiv : OEP «GRIFRE», 2006. – 125 p. Text : direct. (in Ukrainian)
7. IEC 60652 (2021). Overhead line structures. Loading tests : International standard : Supersedes IEC 60652 (2002) : This International Standard was approved by July 30, 2021 / developer IEC. – Geneva, Switzerland : [s. n.], 2021. – 26 p. – Text : direct.
8. Bolotin, V. V. Application of methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures. – Moscow : Stroyizdat, 1971. – 248 p. – Text : direct. (in Russian)
9. Bronshtein, E. I.; Kolosov, I. S. Accidents of overhead power lines with voltage 35–220 kV. – Text : direct. – In: *Proceedings of the Frunze Polytechnic Institute*. – 1969. – Issue 39 «Energy». – P. 83–91. (in Russian)
10. Tetior, A. N.; Pomeranets, V. N. Inspection and testing of structures. – Kyiv : Higher school, 1988. – 207 p. – Text : direct. (in Russian)
11. SP 16.13330.2017. Steel structures : official publication : updated version of SNIIP II-23-81* (with

- Э. И. Бронштейн, И. С. Колосов. – Текст : непосредственный // Труды Фрунзенского политехнического института. – 1969. – Выпуск 39 «Энергетика». – С. 83–91.
10. Тетиор, А. Н. Обследование и испытание сооружений / А. Н. Тетиор, В. Н. Померанец. – Киев : Высшая школа, 1988. – 207 с. – Текст : непосредственный.
 11. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции = Steel structures : издание официальное : актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправкой, с Изменениями № 1, 2) : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр : дата введения 2017-08-28 / исполнители АО «НИЦ «Строительство», ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, МГСУ, СПбГАСУ. – Москва : Минстрой России, 2017. – 152 с. – Текст : непосредственный.
 12. Оржеховский, А. Н. Особенности напряженно-деформированного состояния и надежность проектируемых и эксплуатируемых рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Оржеховский Анатолий Николаевич ; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Makeevka, 2017. – 159 с. – Текст : непосредственный.
 13. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кошиати. – Москва : Стройиздат, 1988. – 584 с. – Текст : непосредственный.
 14. Танасогло, А. В. Численно-аналитическая методика решения задачи устойчивости пространственных решетчатых конструкций / А. В. Танасогло. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 2015. – Том 21, № 3. – С. 107–117.
 15. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування : затверджено та надано чинності Наказом Мінбуду України від 3 липня 2006 р. № 220 : введено вперше : введено в дію 2007-01-01 / розроблено Відкритим акціонерним товариством «Український науководослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського» (ВАТ УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського). – Київ : Мінбуд України, 2006. – 61 с. – Текст : непосредственный.
 16. Horokhov, Ye. V. Principles of Overhead Line Reliability and Longevity Increasing under Ice and Wind Loads / Ye. V. Horokhov, S. V. Turbin, G. I. Grimud. – Текст : непосредственный // 15 Internationale Baustoffagung, 24–27 September 2003, Weimar. – Bundesrepublik : Deutschland, 2003. – P. 1427–1439.
 17. Kazakevitch, M. Interaction of Wind with the Ice-Covered Members / M. Kazakevitch, I. Grafsky. – Amendment, with Changes № 1, 2) : approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated February 27, 2017 № 126/pr : date of introduction 2017-08-28 / performers of JSC «National Research Center «Construction», TsNIISK named after V. A. Kucherenko, MGSU, SPbGASU. – Moscow : Ministry of Construction of Russia, 2017. – 152 p. – Text : direct. (in Russian)
 12. Orzhekhovskiy, A. N. Features of the stress-strain state and reliability of designed and operated frame-cantilever coverings over stadium stands : specialty 05.23.01 «Building structures, buildings and structures» : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Orzhekhovskiy Anatoly ; Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. – Makeevka, 2017. – 159 p. – Text : direct. (in Russian)
 13. Augusti, G.; Baratta, A.; Cosciati, F. Probabilistic methods in construction design. – Moscow : Stroyizdat, 1988. – 584 p. – Text : direct. (in Russian)
 14. Tanasoglo, A. V. Numerical-analytical design procedure of solution the stability problem of spatial lattice structures. – Text : direct. – In: *Metal Constructions*. – 2015. – Volume 21, № 3. – P. 107–117. (in Russian)
 15. DBN V.1.2-2:2006. System for ensuring the reliability and safety of construction projects. Loading and impact. Design standards : approved and put into effect by Order of the Ministry of Construction of Ukraine dated July 3, 2006 № 220: introduced for the first time : introduction date 2007-01-01 / developed by the Open Joint-Stock Company «Ukrainian Research and Design Institute of Steel Structures named after. V. M. Shimanovsky» (JSC UkrNIIproektstalkonstruktziya named after V. M. Shimanovsky). – Kyiv : Ministry of Construction of Ukraine, 2006. – 61 p. – Text : direct. (in Ukrainian)
 16. Horokhov, Ye. V.; Turbin, S. V.; Grimud, G. I. Principles of Overhead Line Reliability and Longevity Increasing under Ice and Wind Loads. – Text : direct. – In: *15 Internationale Baustoffagung, 24–27 September 2003, Weimar*. – Bundesrepublik : Deutschland, 2003. – P. 1427–1439.
 17. Kazakevitch, M.; Grafsky, I. Interaction of Wind with the Ice-Covered Members. – Text : direct. – In: *Proceeding 12th International Association for Bridge and Structural Engineering Congress, 3–7 September 1984, Vancouver, BC*. – Zurich, Switzerland : IABSE, 1984. – P. 853–857.
 18. Freathy, P. E. Misuse of standards: why wind damage occurs at low wind speeds? – Text : direct. – In: *Proceeding of the 4th UK Conferences on Wind Engineering, 2–4 September 1998, Bristol*. – Bristol : PF Consultants, 1998. – P. 201–202.
 19. AIJ Recommendations for Loads on Buildings / Architectural institute of Japan (AIJ). – Tokyo : Architectural institute of Japan, 1996. – 133 p. – Text : direct.

- Текст : непосредственный // Proceeding 12th International Association for Bridge and Structural Engineering Congress, 3–7 September 1984, Vancouver, BC. – Zurich, Switzerland : IABSE, 1984. – P. 853–857.
18. Freathy, P. E. Misuse of standards: why wind damage occurs at low wind speeds / P. E. Freathy. – Текст : непосредственный // Proceeding of the 4th UK Conferences on Wind Engineering, 2–4 September 1998, Bristol. – Bristol : PF Consultants, 1998. – P. 201–202.
 19. AIJ Recommendations for Loads on Buildings / Architectural institute of Japan (AIJ). – Tokyo : Architectural institute of Japan, 1996. – 133 p. – Текст : непосредственный.
 20. European Standard. Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures – Part 1 : Basis of design : German version ENV 1991-1:1994 : Supersedes DIN EN 1990(2002-10) : approved by CEN on 01 December 1995. – Brussels : CEN, 1995. – 55 p. – Текст : непосредственный.
 21. Belgian experience on initiatives to improve the capability of existing overhead lines / J. Lamsoul, J. Rogier, P. Couneson [et al.]. – Paris : [s. n.], 2000. – 6 p. – Текст : непосредственный.
 20. European Standard. Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures – Part 1 : Basis of design : German version ENV 1991-1:1994 : Supersedes DIN EN 1990(2002-10) : approved by CEN on 01 December 1995. – Brussels : CEN, 1995. – 55 p. – Текст : direct.
 21. Lamsoul, J.; Rogier, J.; Couneson, P. [et al.]. Belgian experience on initiatives to improve the capability of existing overhead lines. – Paris : [s. n.], 2000. – 6 p. – Текст : direct.

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия и архитектуры». Иностраный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины, Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Смирнова Наталья Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлических конструкций и сооружений ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность электросетевых конструкций, обеспечение безотказности воздушных линий электропередачи на основе теории управления рисками.

Оржеховский Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование действительной работы и показателей надежности стержневых систем в строительстве, численные методы расчета пространственных стержневых конструкций.

Gorokhov Yevgen – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Department the Head of the Metal Structures and Constructions Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Academician of the Academy of Higher Education and the Academy of Construction of Ukraine, Member of the International Committee for the Study of the Effects of Wind on Buildings and Structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

Smirnova Natalia – Ph. D. (Eng.), senior lecturer of the Department of Metal Constructions and Structures, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: operational reliability and longevity of power supply structures, and protection of overhead power transmission lines on the basis of the theory of risk management.

Orzhekhovsky Anatoly – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: the study of real work and reliability indicators of pivotal systems in construction, numerical methods for calculating spatial pivotal structures.