

© А. Э. Иньков, ст. преподаватель  
© С. А. Соловьев, канд. техн. наук, доцент  
(Вологодский государственный университет,  
Вологда, Россия)  
E-mail: inkovaie@vogu35.ru, solovevsa@vogu35.ru  
© С. Н. Савин, д-р техн. наук, профессор  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: savinsn@gmail.com

© A. E. Inkov, senior lecturer  
© S. A. Solovyev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Vologda State University,  
Vologda, Russia)  
E-mail: inkovaie@vogu35.ru, solovevsa@vogu35.ru  
© S. N. Savin, Dr. Sci. Tech., Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: savinsn@gmail.com

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ФЕРМ НА ЗАДАННЫЙ ИНДЕКС НАДЕЖНОСТИ

### PROBABILISTIC DESIGN OF STATICALLY INDETERMINATE TRUSSES FOR A GIVEN RELIABILITY INDEX

Разработан вероятностный подход к оценке надежности стальных ферм на основе метода Монте-Карло (MCS). Предложен алгоритм, учитывающий случайные нагрузки, свойства материалов и геометрические параметры сечений. Сравнительный анализ показал, что статически определимые системы при равной надежности могут быть менее материалоемки, чем неопределимые. Вероятность безотказной работы обоснована как универсальный критерий сравнения надежности. Результаты численных экспериментов демонстрируют значительное влияние допусков на геометрические параметры сечений на надежность конструкции, что подтверждает важность учета вероятностной природы случайных величин в проектировании для оптимизации конструктивных решений.

*Ключевые слова:* вероятностное проектирование, надежность, случайные параметры, ферма.

There has been developed a probabilistic approach for assessing the reliability of steel trusses based on the Monte Carlo Simulation (MCS) method. An algorithm is proposed that accounts for random loads, material properties, and cross-sectional geometric parameters. A comparative analysis reveals that statically determinate systems, at equal reliability levels, may be less material-intensive than indeterminate ones. Probability of failure-free operation is justified as a universal reliability comparison criterion. The results of numerical experiments demonstrate the significant influence of geometric parameter tolerances on structural reliability, which confirms the importance of considering the probabilistic nature of random variables in design to optimize structural solutions.

*Keywords:* probabilistic design, reliability, random parameters, truss.

#### Введение

Надежность элемента строительной конструкции представляет собой его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. Существует множество показателей надежности объекта в соответствии с Национальным стандартом ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения», однако в инженерно-строительной сфере наиболее часто ис-

пользуемыми метриками являются индекс надежности и вероятность безотказной работы. Получить оценку данных показателей можно с применением вероятностных расчетов [1].

Вероятностная оценка надежности элементов строительных конструкций, в том числе ферм, может служить критерием уровня безопасности строительных объектов. Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций

(ЦНИИСК) им. В. А. Кучеренко (АО «НИЦ „Строительство“») в 2023 году выполнил анализ современных подходов к оценке надежности в строительстве [2]. Итоговыми выводами исследования стали: «безусловно, в современных условиях необходимо внедрять в нормирование механизмы для быстрого внедрения инноваций и новых технологий в строительстве. В области надежности — дополнительные вероятностные критерии надежности и методы оценки рисков». Как отмечается в исследовании [3], «исследования и нормативное закрепление допустимых вероятностей отказа являются одной из первостепенных задач научного сообщества и национальных органов в области разработки строительных норм и правил». Там же отмечается, что «отсутствие целевых значений вероятности отказа сдерживает развитие и внедрение вероятностных методов проверок предельных состояний, так как расчетное (полученное) значение вероятности отказа не с чем сравнивать и, соответственно, невозможно сделать вывод о достаточности надежности».

Существуют различные подходы к вероятностному анализу надежности стержневых систем, в том числе ферм. В [4] отмечено, что в общем случае методы анализа надежности стержневых систем можно разделить на аналитические (несимуляционные) методы и MCS-методы (методы Monte Carlo Simulation). Так, в исследовании [5] решена задача вероятностной оптимизации стальных ферм с применением метода ветвей и границ (B&B, branch and bounds). В [6] используется гибридный метод Монте-Карло для анализа напряженно-деформированного состояния стержневой системы. Рассматриваются различные расчетные случаи (когда часть параметров являются случайными, а часть детерминированными), что позволяет проанализировать фактор чувствительности стержневой системы к случайной природе отдельных расчетных параметров.

Важным аспектом при оценке надежности ферм как стержневых систем является корректный анализ видов и режимов отказов, что особенно актуально для статически неопределимых систем. В исследовании [7] выполнен анализ отказов ферм как стержневых систем, где установлено, что оптимальная отказоустойчивая структура стремится к вариации номинальной конструкции с перекрывающимися элементами (полное резервирование). В работе [8] разработан алгоритм для оценки путей отказа стержневых систем при нормальном распределении всех случайных величин в расчетной математической модели предельного состояния. Аналогично в [9] выполнены исследования путей отказа статически неопределимых ферм с введением показателей безопасности систем для их сравнительного анализа. В [10] разработана методика анализа надежности ферм как стержневых систем с учетом корреляционных связей и моделированием стержневых систем как последовательно-параллельных. Однако аналитическое представление работы стержневых систем в виде последовательно-параллельных систем не позволяет в полной мере описать фактические конструкционные особенности стальных ферм.

Как показано в работах [11, 12], при статистическом анализе реальных данных в задачах строительного проектирования — распределения функции предельного состояния и запасов прочности, как правило, оказываются существенно ненормальными: наблюдаются асимметрия, высокая эксцессивность и отклонения в хвостовых областях, из-за чего проверка гипотезы о нормальности часто отвергается. Следовательно, оценка показателя надежности стальной фермы в виде индекса надежности может быть нерелевантной из-за прямой связи нормального распределения вероятностей с индексом надежности и вероятностью безотказной работы. Для объективного сравнения надежности нескольких технических систем

более эффективно использовать показатель вероятности отказа или вероятности безотказной работы.

В настоящей работе исследуется проблема формирования единого алгоритма вероятностного расчета стальных плоских ферм на заданный уровень надежности как систем с анализом различных конструктивных решений.

### Методы

Оценка надежности шарнирно-стержневой системы, например представленной стальной фермой, выполняется на основе математических моделей предельного состояния. В рамках данного исследования в качестве критериев предельных состояний приняты прочность и устойчивость стержневой фермы.

Аналитические методы анализа надежности, например FOSM (First Order Second Moment) или FORM (First Order Reliability Method), могут привести к низкой точности при оценке надежности в случае различных функций распределений вероятностей и нелинейной математической модели [13–15]. В данном исследовании принят численный метод анализа надежности — метод Монте-Карло (MCS) [1, 16, 17].

Действующее усилие  $S$  рассчитывается через решение системы уравнений равновесия МКЭ [18]:

$$KU = F, \quad (1)$$

где  $K$  — глобальная матрица жесткости;  $U$  — вектор перемещений;  $F$  — вектор нагрузок.

Усилие в стержне определяется по закону Гука как

$$S = \frac{EA}{L} \Delta L, \quad (2)$$

где  $E$  — модуль упругости;  $A$  — площадь сечения;  $L$  — длина стержня;  $\Delta L$  — удлинение стержня:

$$\Delta L = c^T U_{\text{лок}}, \quad (3)$$

здесь  $c = [-\cos \theta, -\sin \theta, \cos \theta, \sin \theta]$  — вектор направляющих косинусов;  $U_{\text{лок}} = [u_1, v_1, u_2, v_2]^T$  — перемещения узлов стержней.

Таким образом, уравнения предельных состояний принимают вид

$$g_i = \begin{cases} \sigma_{v,i} \cdot A_i - S_i, & \text{если } S_i > 0 \\ \varphi_i \cdot \sigma_{v,i} \cdot A_i - |S_i|, & \text{если } S_i \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

где  $\sigma_{v,i}$  — предел текучести стали;  $\varphi_i$  — коэффициент продольной устойчивости стержня.

Каждое уравнение рассчитывается  $N$  раз, где  $N$  — количество генераций исходных данных (для точности  $10^{-6}$  требуется 1 000 000 генераций). Вероятность отказа  $i$ -го стержня  $p_i$  определяется как

$$p_i = \frac{n_{\text{fail},i}}{N}, \quad (5)$$

где  $n_{\text{fail},i}$  — количество случаев отказа  $i$ -го стержня;  $N$  — общее количество симуляций Монте-Карло.

Для оценки системной надежности шарнирно-стержневых конструкций разработан последовательный вероятностный алгоритм, учитывающий особенности работы статически неопределимых систем:

1. На первом этапе определяется вероятность безотказной работы системы:

$$P_1 = 1 - N^{-1} \cdot \sum I[\exists i : g_i \leq 0], \quad (6)$$

где  $I[\ ]$  — индикаторная функция, принимающая значение 1 при отказе хотя бы одного элемента.

2. Для статически неопределимых систем выполняется итерационный перерасчет с модификацией матрицы жесткости после каждого отказа элемента:

$$K_{\text{mod}} = K - \sum \Delta K \quad (7)$$

где  $\Delta K_j$  — вклад  $j$ -го отказавшего элемента в глобальную матрицу жесткости.

Усилия перераспределяются согласно соотношению

$$S_{\text{mod}} = K_{\text{mod}}^{-1} \cdot F. \quad (8)$$

Итерационный процесс продолжается до выполнения одного из критериев остановки: ферма становится механизмом, достижение степени статической неопределимости по числу отказавших элементов, отсутствие новых отказов при перерасчете.

Следует отметить, что действующие нормативные документы не допускают отказы

несущих элементов. Поэтому в качестве основной меры надежности принимается значение  $P_1$  по формуле (6). Однако для демонстрации реального запаса несущей способности, характерного для статически неопределимых систем, в дополнительных расчетах могут учитываться случаи, когда система сохраняет работоспособность после частичных отказов.

**Результаты**

Для анализа надежности шарнирно-стержневых систем предложенным подходом на практике была создана расчетная программа в MATLAB. Примеры реализации предложенных алгоритмов оценки надежности рассмотрены ниже на ряде инженерных задач по расчету ферм.

*Пример 1. Анализ надежности статически неопределимой фермы.*

Исходные данные для расчета представлены в обобщенном виде на рис. 1, стержни подразделяются на группы с одинаковыми характеристиками. Параметры случайных величин приведены в табл. 1.

В результате работы предложенного алгоритма вычисляется количество отказов элементов (рис. 2) и определяются распределения, описывающие значения функции предельного состояния для каждой группы

стержней (рис. 3). Принадлежность к какому-либо распределению определяется по критерию Акаике (AIC, Akaike Information Criterion).

Также выводятся результаты анализа надежности (табл. 2): по формуле (6) —  $P_1$  и для сравнения результатов как для последовательной системы стержней (произведение вероятностей безотказной работы всех стержней фермы) —  $P_2 = \prod (1 - p_i)$ .

*Пример 2. Задача: запроектировать фермы (рис. 4) с надежностью  $\geq 0,9995$ ;  $\geq 0,99993$ ;  $\geq 0,999991$  (по аналогии с EN 1990 для классов надежности RC1, RC2, RC3 расчет на 50 лет).*

Сравним надежность нескольких вариантов ферм одинакового пролета (см. рис. 4), но разной конфигурации. Результаты анализа приведены в табл. 3 и на рис. 5, надежность вычисляется по формуле (6).

**Обсуждение**

В приведенных примерах в качестве меры надежности использовалась вероятность безотказной работы. Индексы надежности, используемые в различных методиках, зачастую нельзя сравнить между собой: индекс надежности по Еврокоду (EN 1990) принимает положительные значения, и надежными являются конструкции с индексом  $\geq 3,3$ . В безвероятностной теории индекс

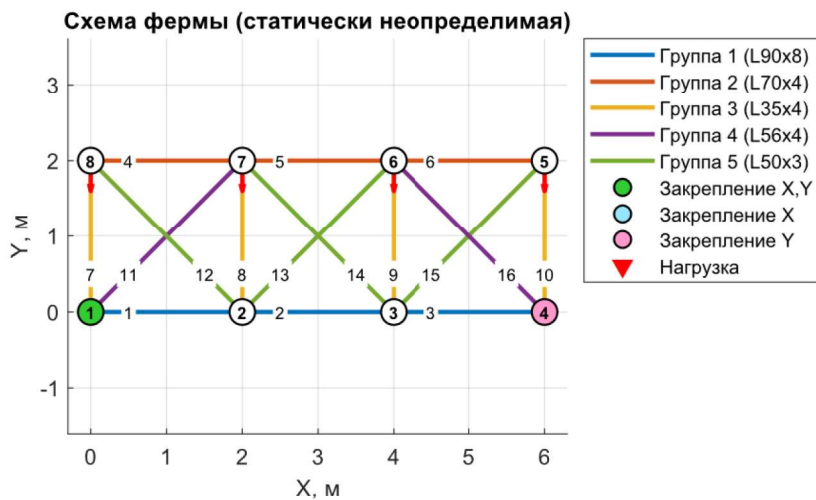


Рис. 1. Расчетная схема фермы

надежности принимает значения в интервале [0; 1], и надежной считается конструкция с индексом, близким к 1 [19]. В методике [20] значение индекса надежности выражается

положительным числом и надежной считается конструкция с индексом  $\geq 1$ . Очевидно, сравнивать эти индексы между собой нельзя. Авторы предлагают в качестве численной

Таблица 1

Параметры случайных величин

Случайная величина	Распределение вероятности	Параметры
Собственный вес	Постоянная величина	По расчету (данные из сортамента)
Полезная нагрузка	Постоянная величина	2 кПа
Вес покрытия	Нормальное	$m = 0,34924$ кПа; $S = 0,01746$ кПа; $\nu = 0,05$
Вес прогонов (12П)	Равномерное	[0,1; 0,3] кПа
Снеговая нагрузка	Гумбеля	(3-й снеговой район) $\alpha = 0,27959$ кПа; $\beta = 0,85249$ кПа
Прочность стали	Нормальное	$m = 261,44$ МПа; $S = 13,07$ МПа; $\nu = 0,05$
Модуль упругости	Нормальное	$m = 206,0$ ГПа; $S = 12,6$ ГПа; $\nu = 0,06$
Геометрические параметры (площадь сечения, момент инерции, радиус инерции сечения), вычисляемые в зависимости от линейных размеров сечения $b$ , $h$ и $t$	Усеченное нормальное распределение	$m$ — из сортамента; $\nu = 0,05$ ; границы усечения — допуски по ГОСТ для уголков нормальной точности

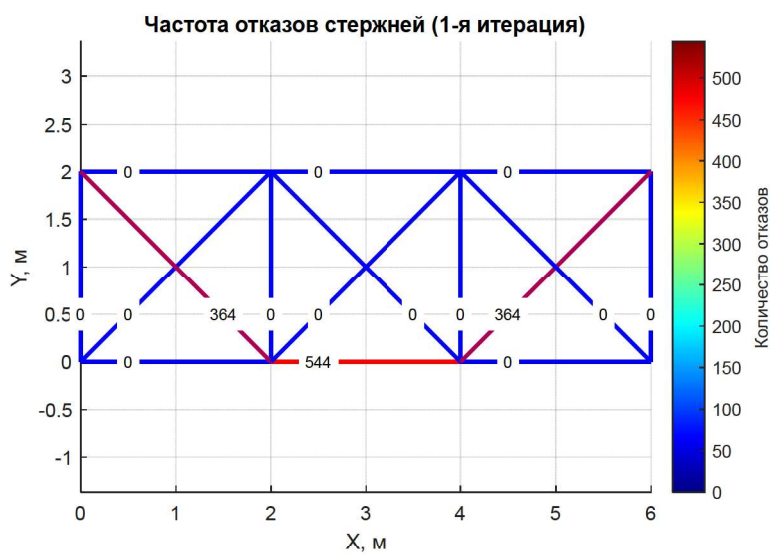


Рис. 2. Частота отказов стержней

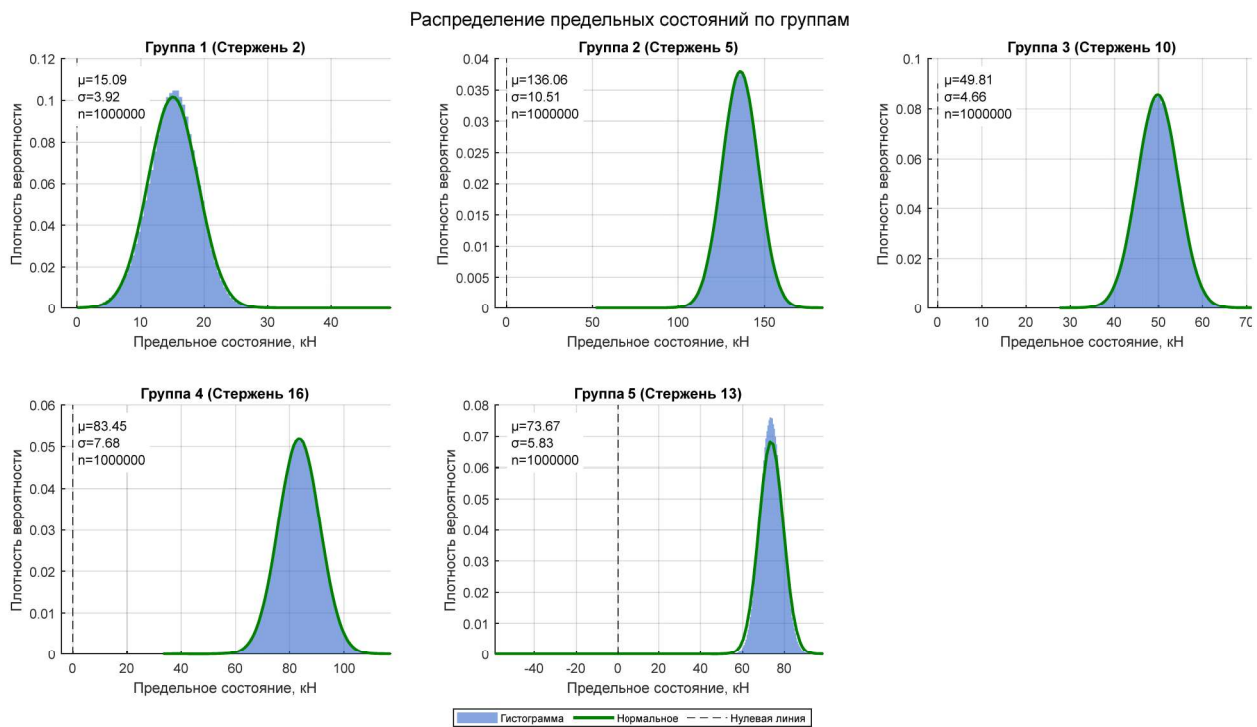


Рис. 3. Распределение предельных состояний по группам стержней

характеристики надежности использовать вероятность безотказной работы — для возможности сравнения результатов, посчитанных различными методиками, без дополнительных преобразований.

В ходе данной работы был рассчитан сортамент сечений из уголков обычной точности с учетом допусков по ГОСТ 8509–93, его часть представлена в табл. 4.

Анализ данных, представленных в табл. 4, показывает, что даже незначительные допуски на отклонение линейных размеров сечений приводят к существенной вариации их геометрических характеристик. В частно-

сти, минимальное значение момента инерции может отклоняться от математического ожидания на величину до 25 %. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости исследований надежности конструкций с учетом изменчивости геометрических параметров сечений в расчетных моделях, поскольку это может приводить к значительной недооценке возможных предельных состояний конструкции.

### Выводы

1. В настоящем исследовании разработан алгоритм полного вероятностного анализа плоских шарнирно-стержневых систем.

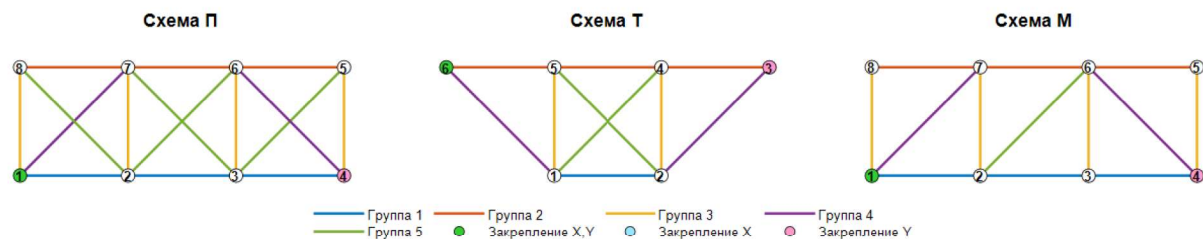


Рис. 4. Типы рассматриваемых ферм

Таблица 2

Результаты анализа надежности (P) для примера 1

$P_1$	$P_2 = \prod(1 - p_i)$	Разница
0,999129	0,998704	0,000425
Количество случаев, когда после отказа минимум одного стержня ферма на следующих итерациях не разрушилась, — 264		

Предложенный алгоритм обладает универсальностью и может быть расширен на любые критерии предельных состояний, формализуемые математически.

2. Результаты численного моделирования подтверждают практическую применимость предложенного алгоритма для инженерных расчетов при оценке надежности конструкций.

3. Проведенный анализ показал, что повышение надежности статически определенных ферм за счет увеличения сечений элементов может являться более эффективным решением по сравнению с переходом к статически неопределимой схеме с введением дополнительных связей. При равном уровне надежности статически определимая система характеризуется меньшей материалоемкостью, что подтверждается сравнительными расчетами.

4. Современные нормативные методы проектирования строительных конструкций в России не предусматривают инструментов для сравнительного анализа надежности ферм различных типов. Существующие под-

Таблица 3

Результаты анализа надежности для примера 2

Сечение Тип фермы	Нижний пояс (гр. 1)	Верхний пояс (гр. 2)	Стойка (гр. 3)	Опорный раскос (гр. 4)	Раскос (гр. 5)	Надежность	Вес, кг
П-1	L60x5	L25x3	L30x3	L50x4	L45x4	0,999538	93,22
П-2	L50x7	L25x3	L30x3	L50x4	L50x3	0,999984	96,84
П-3	L60x5	L30x3	L30x3	L50x5	L50x4	0,999999	102,35
Т-1	L70x5	L35x3	L32x3	L70x5	L30x3	0,999675	64,33
Т-2	L70x5	L35x3	L32x3	L75x5	L30x3	0,999997	66,70
Т-3	L70x5	L35x3	L32x3	L80x5	L30x3	0,999999	72,25
М-1	L50x6	L25x4	L20x3	L40x3	L30x3	0,999798	57,01
М-2	L50x6	L25x4	L20x3	L40x4	L30x3	0,999980	60,24
М-3	L60x6	L30x4	L20x3	L40x3	L30x3	0,999999	67,92

Таблица 4

Сортамент уголков обычной точности с учетом допусков

Сечение	Площадь, см <sup>2</sup>			$I_x$ , см <sup>4</sup>			$W_x$ , см <sup>3</sup>			$i_x$ , мм		
	min	$\mu$	max	min	$\mu$	max	min	$\mu$	max	min	$\mu$	max
L20x3	0,94	1,13	1,3	0,30	0,40	0,50	0,22	0,28	0,34	5,65	5,94	6,23
L45x5	3,88	4,29	4,64	6,97	8,03	9,05	2,22	2,51	2,77	13,41	13,68	13,97
L50x5	4,21	4,8	5,23	9,29	11,2	12,92	2,66	3,13	3,51	14,85	15,27	15,72
L70x10	12,1	13,11	13,9	51,38	57,89	63,95	10,68	11,82	12,8	20,61	21,02	21,45
L100x10	17,6	19,24	20,38	157,71	178,95	197,01	22,39	24,97	26,99	29,93	30,5	31,1
L150x15	40,61	43,08	44,77	835,68	908,38	968,7	78,79	84,66	89,16	45,36	45,92	46,51
L200x20	72,5	76,54	79,57	2643,24	2871,16	3073,42	187,33	200,73	211,82	60,38	61,25	62,15
L250x35	157,11	163,71	168,7	8630,52	9280,97	9876,86	500,57	530,1	555,22	74,12	75,29	76,52

$\mu$  — матожидание, значение характеристики, аналогичное ГОСТ 8509–93; min и max — вычисленное соответственно минимальное и максимальное значение характеристики.

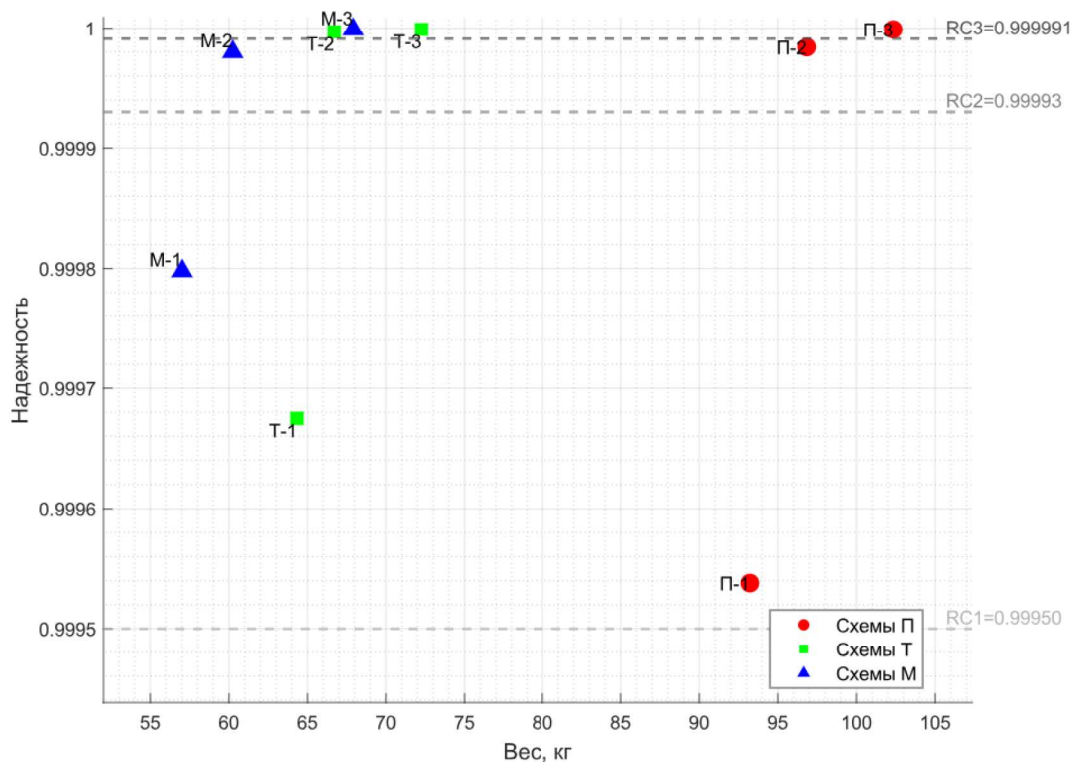


Рис. 5. Результаты анализа надежности для примера 2

ходы, основанные на расчете по предельным состояниям, позволяют лишь установить соответствие конструкции нормативным требованиям, но не оценивают степень ее надежности. Как показали расчеты, даже незначительное увеличение сечений элементов (приводящее к росту массы конструкции не более чем на 10 %) может обеспечить существенное повышение надежности: при увеличении вероятности безотказной работы, например, с  $0,999538$  до  $0,999999$  соответствующая вероятность отказа уменьшается с  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$ , то есть более чем на два порядка.

#### Библиографический список

1. Соловьев С. А., Соловьева А. А. Надежность строительных конструкций: история, анализ, прогноз. М.: АСВ, 2025. 468 с.
2. Лебедева И. В., Петрова Т. А. Анализ современных подходов к оценке надежности в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2023. № 3 (38). С. 20–36.
3. Надольский В. В. Нормируемые значения вероятности отказа строительных конструкций // Строительство и реконструкция. 2024. № 5. С. 70–81.
4. Song J., Kang W.-H., Lee Y.-J., Chun J. Structural system reliability: Overview of theories and applications to optimization // ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering. 2021. Vol. 7 (2). Art. 03121001. DOI 10.1061/AJRUA6.0001122.
5. Kaveh A., Hamedani K. B., Kamalinejad M. Set theoretical variants of optimization algorithms for system reliability-based design of truss structures // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2021. Vol. 65 (3). Pp. 717–729. DOI 10.3311/PPci.17519.
6. Potrzyszcz-Sut B. Reliability analysis of shell truss structure by hybrid Monte Carlo method // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2020. Vol. 58 (2). Pp. 469–482. DOI 10.15632/jtam-pl/118886.
7. Kirby J., Zhou S., Xie Y. M. Optimal fail-safe truss structures: new solutions and uncommon characteristics // Acta Mechanica Sinica. 2022. Vol. 38 (6). 421564. DOI 10.1007/s10409-022-09028-3.
8. Karmakar C. Reliability Based Approach To Study The Critical Failure Path Of Truss Structures: dissertation. Kolkata, 2019. 146 p. URL: <http://20.198.91.3:8080/jspui/>

bitstream/123456789/7045/1/M.Tech%28Construction%20Engineering%29Chandan%20Karmakar.pdf.

9. Spyridis P., Strauss A. Robustness assessment of redundant structural systems based on design provisions and probabilistic damage analyses // *Buildings*. 2020. Vol. 10 (12). P. 213. DOI 10.3390/buildings10120213.

10. Kubicka K., Radoń U. The system reliability of steel trusses with correlated variables // *Archives of Civil Engineering*. 2024. Vol. 70 (2). Pp. 163–178. DOI 10.24425/ace.2024.149857.

11. Ayyub B. M., Haldar A. Practical structural reliability techniques // *Journal of structural engineering*. 1984. Vol. 110 (8). Pp. 1707–1724. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:8(1707).

12. Ghasemi S. H., Nowak A. S. Reliability index for non-normal distributions of limit state functions // *Structural Engineering and Mechanics*. 2017. Vol. 62 (3). Pp. 365–372. DOI 10.12989/sem.2017.62.3.000.

13. Соловьева А. А., Соловьев С. А., Умнякова Н. П., Кочкин А. А. Вероятностная оценка надежности стальных ферм по критерию прогиба на основе р-блоков // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 4 (102). С. 64–74. DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-64-74.

14. Keshtegar B., Meng Z. A hybrid relaxed first-order reliability method for efficient structural reliability analysis // *Structural Safety*. 2017. Vol. 66. Pp. 84–93.

15. Zhao Y.-G., Ono T. Moment methods for structural reliability // *Structural Safety*. 2001. Vol. 23 (1). Pp. 47–75.

16. Roy A., Chakraborty S. Reliability analysis of structures by a three-stage sequential sampling based adaptive support vector regression model // *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 219. Art. 108260. ISSN 0951-8320. DOI 10.1016/j.res.2021.108260.

17. Zheng Z., Beer M., Nackenhorst U. Efficient stochastic modal decomposition methods for structural stochastic static and dynamic analyses // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2024. Vol. 125 (12). e7469. DOI 10.1002/nme.7469.

18. Гринберг Е. И., Монахов В. А. Автоматизированный расчет шарнирных ферм в смешанной форме МКЭ // *Региональная архитектура и строительство*. 2010. № 1. С. 53–57. EDN MQPJLB.

19. Ben-Haim Y., Elishakoff I. Convex models of uncertainty in applied mechanics. Amsterdam: Elsevier, 1990. 240 p.

20. Jiang C., Zhang Q. F., Han X., Qian Y. H. A non-probabilistic structural reliability analysis method based on a multidimensional parallelepiped convex model // *Acta Mechanica*. 2014. Vol. 225 (2). Pp. 383–395. DOI 10.1007/s00707-013-0975-2.

## References

1. Solov'ev S. A., Solov'eva A. A. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsiy: istoriya, analiz, prognoz* [Reliability of building structures: history, analysis, forecast]. Moscow, ASV Publ., 2025, 468 p.

2. Lebedeva I. V., Petrova T. A. *Analiz sovremennykh podkhodov k otsenke nadezhnosti v stroitel'stve* [Analysis of modern approaches to reliability assessment in construction]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of the Research Center “Construction”*, 2023, no. 3 (38), pp. 20–36.

3. Nado'skiy V. V. *Normiruemye znacheniya veroyatnosti otказа stroitel'nykh konstruktsiy* [Rated values of failure probability of building structures]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and Reconstruction*, 2024, no. 5, pp. 70–81.

4. Song J., Kang W.-H., Lee Y.-J., Chun J. Structural system reliability: Overview of theories and applications to optimization. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2021, vol. 7 (2), Art. 03121001. DOI 10.1061/AJRUA6.0001122.

5. Kaveh A., Hamedani K. B., Kamalinejad M. Set theoretical variants of optimization algorithms for system reliability-based design of truss structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2021, vol. 65 (3), pp. 717–729. DOI 10.3311/PPci.17519.

6. Potrzyszcz-Sut B. Reliability analysis of shell truss structure by hybrid Monte Carlo method. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, vol. 58 (2), pp. 469–482. DOI 10.15632/jtam-pl/118886.

7. Kirby J., Zhou S., Xie Y. M. Optimal fail-safe truss structures: new solutions and uncommon characteristics. *Acta Mechanica Sinica*, 2022, vol. 38 (6), 421564. DOI 10.1007/s10409-022-09028-3.

8. Karmakar C. *Reliability Based Approach to Study the Critical Failure Path of Truss Structures: dissertation*. Kolkata, 2019, 146 p. Available at: <http://20.198.91.3:8080/jspui/bitstream/123456789/7045/1/M.Tech%28Construction%20Engineering%29Chandan%20Karmakar.pdf>.

9. Spyridis P., Strauss A. Robustness assessment of redundant structural systems based on design provisions and probabilistic damage analyses. *Buildings*, 2020, vol. 10 (12), 213 p. DOI 10.3390/buildings10120213.

10. Kubicka K., Radoń U. The system reliability of steel trusses with correlated variables. *Archives of Civil Engineering*, 2024, vol. 70 (2), pp. 163–178. DOI 10.24425/ace.2024.149857.

11. Ayyub B. M., Haldar A. Practical structural reliability techniques. *Journal of structural engineering*, 1984, vol. 110 (8), pp. 1707–1724. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:8(1707).

12. Ghasemi S. H., Nowak A. S. Reliability index for non-normal distributions of limit state functions. *Structural Engineering and Mechanics*, 2017, vol. 62 (3), pp. 365–372. DOI 10.12989/sem.2017.62.3.000.
13. Solov'eva A. A., Solov'ev S. A., Umnyakova N. P., Kochkin A. A. Veroyatnostnaya otsenka nadezhnosti stal'nykh ferm po kriteriyu progiba na osnove r-blokov [Probabilistic assessment of reliability of steel trusses by the criterion of deflection based on p-blocks]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and reconstruction*, 2022, no. 4 (102), pp. 64–74. DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-64-74.
14. Keshtegar B., Meng Z. A hybrid relaxed first-order reliability method for efficient structural reliability analysis. *Structural Safety*, 2017, vol. 66, pp. 84–93.
15. Zhao Y.-G., Ono T. Moment methods for structural reliability. *Structural Safety*, 2001, vol. 23 (1), pp. 47–75.
16. Roy A., Chakraborty S. Reliability analysis of structures by a three-stage sequential sampling based adaptive support vector regression model. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, vol. 219. Art. 108260. ISSN 0951-8320. DOI 10.1016/j.res.2021.108260.
17. Zheng Z., Beer M., Nackenhorst U. Efficient stochastic modal decomposition methods for structural stochastic static and dynamic analyses. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2024, vol. 125 (12). e7469. DOI 10.1002/nme.7469.
18. Grinberg E. I., Monakhov V. A. Avtomatizirovanniy raschet sharnirnykh ferm v smeshannoy forme MKE [Automated calculation of articulated trusses in mixed form FEM]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo – Regional Architecture and Construction*, 2010, no. 1, pp. 53–57.
19. Ben-Haim Y., Elishakoff I. *Convex models of uncertainty in applied mechanics*. Amsterdam, Elsevier, 1990, 240 p.
20. Jiang C., Zhang Q. F., Han X., Qian Y. H. A non-probabilistic structural reliability analysis method based on a multidimensional parallelepiped convex model. *Acta Mechanica*, 2014, vol. 225 (2), pp. 383–395. DOI 10.1007/s00707-013-0975-2.