УДК 624.072:624.014
doi: 10.33622/0869-7019.2022.09.52-56

Выбор рациональных параметров и топологии преднапряженных стальных рамных конструкций

Анатолий Викторович АЛЕКСЕЙЦЕВ, доктор технических наук, доцент, alekseytsevav@mgsu.ru

Екатерина Владимировна ДОМАРОВА, старший преподаватель, domarovaev@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *Предложен подход к выбору рациональных параметров и топологии систем предварительного напряжения металлических стержневых конструкций. Поиск по критерию минимизации стоимости осуществляется на дискретных множествах варьируемых переменных. При этом рассматриваются три частных постановки задачи. Первая предполагает фиксацию уровня преднапряжения и подбор профилей конструктивных элементов. Вторая постановка предусматривает возможность изменения положения системы преднапряжения на конструкции. Третья учитывает варьирование как усилия, создаваемого системой преднапряжения, так и ее расположение. В качестве инструмента для поиска рационального решения принят адаптированный генетический алгоритм. Использование генетического алгоритма предусматривает формирование наборов решений, которые улучшаются в процессе проверки на соответствие выбранному критерию оптимальности. Каждый элемент набора в генетическом алгоритме — это вариант конструкции с заданными параметрами и топологией системы преднапряжения. Работоспособность предлагаемых поисковых процедур подтверждена примерами проектирования рациональных для выбранных начальных условий преднапряженных рам с ферменным ригелем. При этом показано, что преднапряжение — эффективный способ получения несущих систем с минимальной стоимостью при варьировании параметрами конструкции, усилиями и геометрией ее преднапрягающих устройств.*

Ключевые слова: *оптимизация, генетический поиск, преднапряженные фермы, стальные конструкции, нормальная эксплуатация, минимизация стоимости*

Для цитирования: *Алексейцев А. В., Домарова Е. В.* Выбор рациональных параметров и топологии преднапряженных стальных рамных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 52—56. doi: 10.33622/0869-7019.2022.09.52-56

CHOICE OF RATIONAL PARAMETERS AND TOPOLOGY OF PRE-STRESSING STEEL FRAMES STRUCTURES

Anatoliy V. ALEKSEYTSEV, alekseytsevav@mgsu.ru

Ekaterina V. DOMAROVA, domarovaev@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *An approach to the choice of rational parameters and topology of pre-stressing systems of metal bar structures is proposed. The search by the cost minimization criterion is carried out on discrete sets of variable variates. In this case, three particular formulations of the problem are considered. The first involves fixing the prestress level and selecting profiles of structural elements. The second formulation provides for the possibility of changing the position of the pre-stressing system on the structure. The third one takes into account the variation of both the force generated by the pre-stressing system and its location. An adapted genetic algorithm is adopted as a tool for finding a rational solution. The use of a genetic algorithm provides for the formation of sets of solutions that are improved in the process of checking for compliance with the selected optimality criterion. Each element of the set in the genetic algorithm is a design variant with given parameters and topology of the pre-stressing system. The operability of the proposed search procedures is confirmed by examples of designing prestressed frames with truss beams that are rational for the chosen initial conditions. At the same time, it is shown that prestressing is an effective way to obtain bearing systems with a minimum cost by varying the design parameters, forces and geometry of its pre-stressing devices.*

Keywords: *optimization, genetic search, pre-stressed trusses, steel structures, normal operation, cost minimization*

For citation: Alekseytsev A. V., Domarova E. V. Choice of Rational Parameters and Topology of Pre-Stressing Steel Frames Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 9, pp. 52—56. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.09.52-56

Введение

Снижение материалоемкости стальных конструкций — одна из актуальных задач, возникающих при проектировании зданий и сооружений. В настоящее время для оптимизации конструкций на дискретных множествах вариантов структур и параметров про-

© АЛЕКСЕЙЦЕВ А. В., ДОМАРОВА Е. В., 2022

ектирования (типоразмеры профилей стержней, координаты узловых соединений, марки сталей и т. п.) успешно используют алгоритмы эволюционного моделирования, основанные на метаэвристических подходах, которые моделируют аналогии физических процессов в природе. Исследования показывают, что такой подход к оптимизации для данного класса задач достаточно эффективен.

Снижения стоимости рамных конструкций можно достичь с помощью преднапряжения. Вопрос оптимизации преднапряженных стержневых, пластинчатых и оболочечных объектов является актуальным и давно находится в поле зрения многих исследователей [1]. В ряде работ рассматривается оптимизация преднапряженных железобетонных плит [2], балок [3–6], мостовых сооружений [7, 8], вантовых куполов [9] и мачт с преднапряженными оттяжками [10]. Двухэтапный общий подход к оптимизации железобетонных конструкций предложен в работе [11], где с помощью линейного программирования подбирают усилия преднапряжения и конкретные размеры элемента.

Разработана методика оптимизации вантовых ферм на основе эволюционного моделирования [12], где переменные разделены на три группы: сила предварительного напряжения, размеры сечений и положение конструктивных элементов. Оптимизация стальных ферм по двухэтапной схеме, где на первом этапе определяют сечения элементов, а на втором этапе на основе линейного программирования подбирают усилие преднапряжения, показана в работе [13].

С проблемами оптимизации преднапряженных конструкций связаны важнейшие направления исследований. Это прежде всего оценка состояния преднапряженных систем, которая может быть выполнена, например, вибрационным методом [14], а также экспериментальные исследования. Так, экспериментальный анализ поведения стальных ферм, преднапрягаемых канатами, с учетом различных способов связи канатов и элементов ферм, предложен в [15]. Для таких ферм, имеющих трубчатые сечения элементов, исследовали эффекты от предварительного напряжения сжатых и растянутых стержней из различных сталей [16]. Устойчивость стальных преднапряженных колонн изучена в работе [17].

Цель работы – оптимизация преднапряженных стержневых конструкций на основе многопоточной генетической итерационной процедуры. При этом с использованием параллельно функционирующих популяций решается задача поиска минимума стоимости конструкции. Отличительная особенность предлагаемого подхода состоит в варьировании типоразмеров сечений стержней конструкции, расположения и размеров системы преднапряжения, а также преднапрягающих сил в рамках одного вычислительного процесса.

Постановки задачи и методы исследования

Рассмотрим стальную рамную конструкцию, включающую в себя систему преднапряжения канатами. Расчет вариантов конструкции выполняется с учетом физически нелинейной работы материала на основе многослойных конечных элементов [18]. Использование таких элементов обусловлено обеспечением варьирования отдельных размеров сечения. Преднапряжение моделируется введением в расчетную схему сосредоточенных усилий. Исследуем три варианта постановки задачи.

Постановка 1 – параметрический поиск. Минимизируется стоимость C преднапряженной конструкции, для которой усилия и расположение системы преднапряжения не изменяются:

$$C(\{X\}, P) \to \min; \quad (1)$$
$$\{X\} = \{X_1, \ldots, X_n\},$$

где $\{X\}$ – дискретное множество параметров, описывающих варьируемые типоразмеры профилей в стержнях; n – число варьируемых параметров; P – неизменяемые параметры системы преднапряжения;

$$X_i = \{A_i; x_{i1}, y_{i1}, \ldots, x_{ik}, y_{ik}\}, \quad (2)$$
$$i = 1, \ .., n,$$

где A_i – площадь сечения стержня i; $x_{i1}, y_{i1}, ..., x_{ik}, y_{ik}$ – координаты точек в сечении стержня i; k – число точек поперечного сечения, в которых вычисляются напряжения.

Постановка 2 – топологический поиск. Минимизируется стоимость C с учетом возможности изменения геометрии системы предварительного напряжения и с сохранением напрягающего усилия постоянным:

$$C(\{X\}, P, \{Y\}) \to \min; \quad (3)$$
$$\{Y\} = \{Y_1, \ldots, Y_R\};$$
$$\{Y_i\} = \{B_i(x_{bi}, y_{bi}), E_i(x_{ei}, y_{ei})\},$$
$$i = 1, \ .., R,$$

где $\{Y\}$ – множество рассматриваемых положений для передачи усилия преднапряжения на конструкцию; R – число положений, которые характеризуются множеством точек B_i, E_i.

Постановка 3 – структурно-параметрический поиск. Минимизируется функция цели вида

$$C(\{X\}, P, \{Y\}, \{N\}) \to \min; \quad (4)$$
$$\{N\} = \{N_1, \ldots, N_D\}, \quad i = 1, \ .., D,$$

где $\{N\}$ – множество варьируемых уровней преднапрягающего усилия; D – размер этого множества, который определяется возможным числом допускаемых для выбора стержней или канатов.

Для данных постановок оптимизационных задач применяются ограничения по прочности и жесткости преднапряженной

конструкции, а также прочности системы преднапряжения. Это необходимые требования, регламентируемые нормативами СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» и СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия».

Метод поиска решения базируется на итерационной процедуре [19] с основным отличием, которое заключается в модификации процедуры формирования текущего набора решений.

Рассмотрим кратко каждый из этапов оптимизационной процедуры.

1. *Исходные данные для оптимизации.* В зависимости от постановки задачи для заранее сформированной базовой конечно-элементной модели строятся множества варьируемых параметров.

2. *Генерация начального набора решений.* Из сформированных множеств случайно выбираются значения, связанные с варьируемыми параметрами. При этом интерпретация набора G решений и каждого отдельного решения F, описываемого значениями X варьируемых параметров, может быть представлена в виде

$$G_1 = \begin{array}{c|ccc} F_1: & X_{1\tilde{i}}, & \ldots, & X_{n\tilde{i}} \\ \hline \ldots & \ldots, & \ldots, & \ldots, \\ \hline F_{ng}: & X_{1\tilde{i}}, & \ldots, & X_{n\tilde{i}} \end{array} \quad (4)$$

$$\tilde{i} \in rnd([1 \ldots np_i]),$$

где ng — число рассматриваемых на каждой итерации вариантов проекта; n — число варьируемых параметров; np_i — число допустимых значений при варьировании параметра; $rnd(\bullet)$ — оператор случайного выбора числа на дискретном множестве.

3. *Конечно-элементный анализ варианта конструкции.* Выполняется расчет компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) для варианта конструкции, проверяются активные ограничения задачи.

1. Формирование пула текущих решений

Номер объекта	Наименование и описание оператора
1—3	Одноточечная мутация
4—6	Двухточечная мутация
7—9	Регулируемая n-точечная мутация
10, 11	Одноточечный кроссинговер
12, 12	Двухточечный кроссинговер
14	Регулируемый n-точечный кроссинговер и инверсия
15	Лучший вариант из предыдущей итерации

2. Множества варьируемых параметров для двутавровых элементов

N	Размеры сечения, см (*рис. б*)				N	Размеры сечения, см (*рис. б*)		
	h_w	t_w	b_f	t_f		d_1	d_2	$t_1 = t_2$
W1	18,1	0,72	20,3	1,1	T1	6,7056	9,2456	0,457
W2	22,46	0,86	25,4	1,42	T2	6,7056	11,7856	0,457
W3	27,72	0,99	30,5	1,54	T3	9,2456	14,3256	0,457
W4	32,04	1,05	25,5	1,83	T4	11,1099	16,18996	0,795
W5	38,14	1,16	26,1	1,93	T5	14,3256	19,4056	0,457
W6	42,78	1,22	28,2	1,96	T6	14,3256	24,4856	0,457
W7	50,18	1,47	21,4	2,36	T7	18,415	23,495	0,953
W8	57,26	1,31	23	2,22	T8	19,05	29,21	0,635
W9	64,58	1,31	25,4	2,11	T9	23,495	33,655	0,953
W10	71,94	1,38	26,6	1,93	T10	28,575	38,735	0,953
W11	79,74	1,4	29,2	1,88	—	—	—	—
W12	86,28	1,52	30,4	2,01	—	—	—	—

4. *Реализация процедуры сохранения лучшего решения.* Используется база данных лучших по критерию оптимальности объектов, в которой улучшается или сохраняется лучшее решение на основе известной в эволюционном моделировании теории элитизма.

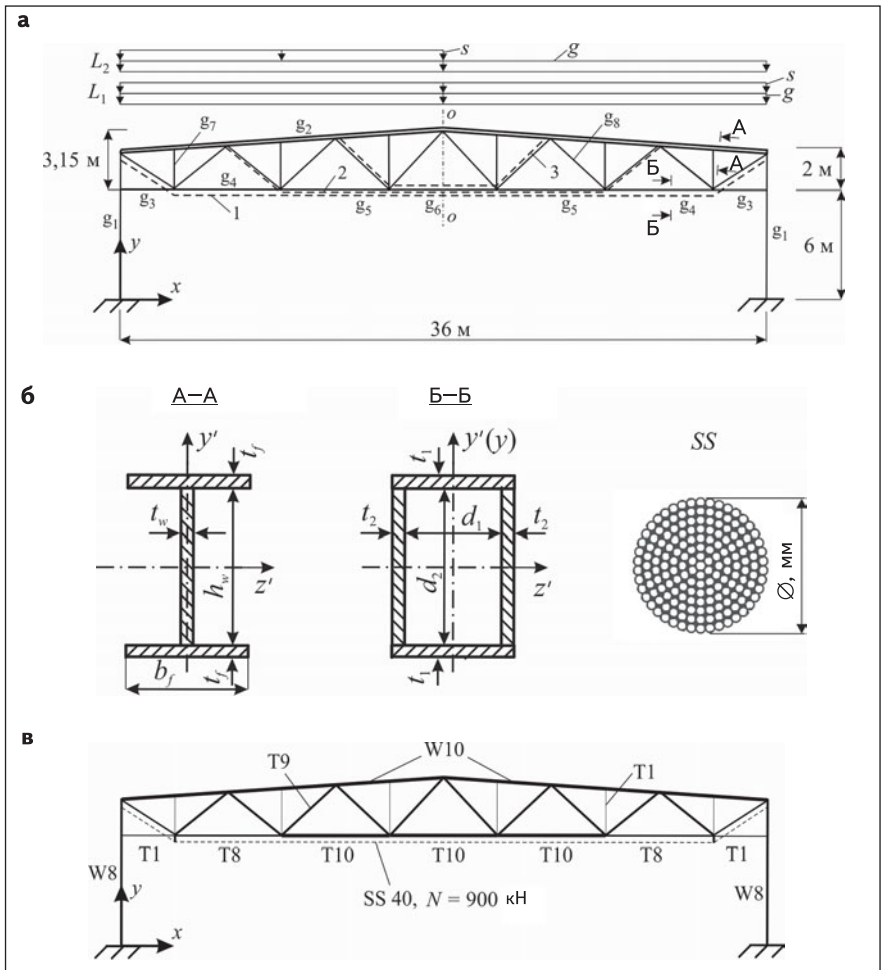
5. *Формирование текущего набора решений с учетом лучшего решения.* Этап включает в себя операции применительно к набору из 15 вариантов конструкций *(табл. 1).*

6. *Остановка вычислений.* При отсутствии улучшений на протяжении 200—300 итераций процесс поиска останавливается. Выбор числа таких итераций выполняется эмпирически. Если улучшения происходят, то пункты 3—6 повторяются.

7. *Проверка пассивных ограничений и контрольный расчет.* Анализ НДС оптимизированной системы происходит с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности, например, по методикам [20]. Если ограничения удовлетворены, то считаем решение полученным, иначе возвращаемся к этапу 2 с соответствующей корректировкой множеств варьируемых параметров.

Результаты исследования

Рассмотрим пример оптимиза-



а — исходные данные; б — схемы сечений элементов фермы и канатов; в — результаты оптимизации; W8, W10, T1...T10 — номера сечений (см. табл. 2)

Исходные данные и результаты оптимизации рамы с ферменным ригелем

ции конструктивного решения одноэтажной рамы здания (*рис. а*) при варьировании расположения затяжки и уровня ее преднапряжения. Рама раскреплена от потери устойчивости из плоскости распорками по верхнему и нижнему поясам стропильной фермы и обвязочными балками по высоте колонн. Учитывали действие двух комбинаций нагрузок L_1 и L_2, включающих в себя нагрузку g от собственного веса рамы и конструкции покрытия, а также снеговую нагрузку s. Стержни рамы изготовлены из стали A529 Gr. 55, предел текучести σ_y = 380 МПа. При расчетах вариантов конструкций напряжения ограничивали σ_y = 360 МПа.

Для колонн и верхнего пояса стропильной фермы варьировались размеры двутавровых профилей (h_w, t_w — высота и толщина стенки, b_f, t_f — ширина и толщина поясов), для остальных элементов фермы использовались профили прямоугольных труб по ASTM A500 (*табл. 2).* Для затяжек могли выбираться марки высокопрочных канатов SS 30, SS 40, SS 50 с усилиями начального преднапряжения, равными соответственно 500, 900 и 1400 кН. Затяжка могла находиться в одном из трех возможных положений (*1, 2, 3*), показанных на *рис. а* штриховой линией.

С учетом симметрии объекта в пределах группы g_1–g_8 (*см. рис. а*) сечение стержней назначали одинаковым. Здесь группа g_1 — колонны, g_2 содержит все элементы верхнего пояса фермы, g_3–g_6 — элементы нижнего пояса, g_7 — стойки, g_8 — стержни решетки. Всего независимо варьировалось десять параметров. Результаты поиска рациональных параметров профилей фермы и системы ее преднапряжения показаны на *рис. в.*

Процесс поиска решения завершался не более чем за 200 итераций генетического алгоритма. Эффект от снижения стоимости по сравнению с аналогичной конструкцией, запроектированной без предварительного напряжения с учетом требований нормативной документации, составил более 18 %.

Вывод

Разработана методика поиска рациональных конструктивных решений для стальных рам с предварительным напряжением конструктивных элементов на основе эволюционного моделирования. Алгоритм оптимизации имеет возможности учета различных вариантов нагружений, независимого варьирования конфигурации и параметров проектируемой конструкции, а также системы преднапряжения в одном итерационном процессе. Предложенный алгоритм позволяет определить для конкретных конструкций рациональное усилие и расположение системы предварительного напряжения. Данный алгоритм рекомендуется к использованию при автоматизированном проектировании зданий и сооружений со стальными каркасами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. *Тамразян А. Г., Алексейцев А. В.* Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 12–30.
1. Tamrazyan A. G., Alekseytsev A. V. Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures. *Vestnik MGSU*, 2020, no. 15(1), pp. 12–30. (In Russ.).
2. Ivashenko I. A. Optimization of the prestress value in binding of reinforced concrete structures [Оптимизация усилия преднапряжения при соединении железобетонных конструкций]. *Procedia Engineering*, 2016, no. 150, pp. 1771–1775.
3. Eurviriyanukul S., Askes H. Tendon layout optimization through configurational forces equilibration in plane stress analysis of prestressed concrete structures [Оптимизация преднапряженного армирования на основе равновесия плоских сечений предварительно напряженных железобетонных конструкций]. *Computers & Structures*, 2011, no. 89, pp. 1673–1680.
4. Barakat S., Bani-Hani K., Taha M. Q. Multi-objective reliability-based optimization of prestressed concrete beams [Многокритериальная оптимизация предварительно напряженных железобетонных балок на основе теории надежности]. *Structural Safety*, 2004, no. 26, pp. 311–342.
5. Steensels R. et al. A two-stage modelling approach for the analysis of the stress distribution in anchorage zones of pre-tensioned, concrete elements [Двухэтапный подход к моделированию распределения напряжений в зонах анкеровки предварительно напряженных железобетонных элементов]. *Engineering Structures*, 2017, no. 15, pp. 384–397.
6. Khaleel M. A., Itani R. Y. Optimization of partially prestressed concrete girders under multiple strength and serviceability criteria [Оптимизация частично предварительно напряженных железобетонных ферм с использованием мультипликативного критерия прочности и эксплуатационной пригодности]. *Computers & Structures*, 1993, no. 49, pp. 427–438.
7. Martí J. V. ey al. Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing [Проектирование сборных автомобильных мостов из предварительно напряженного железобетона методом симуляции отжига]. *Engineering Structures*, 2013, no. 48, pp. 342–352.
8. Rana S., Islam N., Ahsan R., Ghani S. N. Application of evolutionary operation to the minimum cost design of continuous prestressed concrete bridge structure [Эволюционная процедура минимизации стоимости неразрезной предварительно напряженной железобетонной конструкции моста]. *Engineering Structures*, 2013, no. 46, pp. 38–48.
9. Quagliaroli M., Malerba P.G., Albertin A., Pollini N. The role of prestress and its optimization in cable domes design [Роль предварительного напряжения и его оптимизация при проектировании вантовых куполов]. *Computers & Structures*, 2015, no. 161, pp. 17–30.
10. Guo J., Jiang J. An algorithm for calculating the feasible pre-stress of cable-struts structure [Алгоритм расчета допустимого предварительного напряжения вантовой конструкции]. *Engineering Structures*, 2016, no. 118, pp. 228–239.
11. Kirsch U. Two-level optimization of prestressed structures [Двухуровневая оптимизация предварительно напряженных конструкций]. *Engineering Structures*, 1997, no. 19, pp. 309–317.
12. Ailin Z. et al. The shape optimization design of prestressed cable-truss structure based on evolutionary method of nodes [Оптимизация формы предварительно напряженной вантово-ферменной конструкции на основе эволюционного поиска расположения узлов]. *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*, 2005, no. II, pp. 1335–1340.
13. Levy R., Hanaor A. Optimal design of prestressed trusses [Оптимальное проектирование предварительно напряженных ферм]. *Computers & Structures*, 1992, no. 43, pp. 741–744.
14. Ruocci G., Cumunel G., Le T. et al. Damage assessment of pre-stressed structures: a SVD-based approach to deal with time-varying loading [Оценка повреждений предварительно напряженных конструкций: сингулярное разложение для изменяющейся во времени нагрузки]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, no. 47, pp. 50–65.
15. Gosaye J. et al. Compressive behaviour and design of prestressed steel elements [Расчет и проектирование сжатых предварительно напряженных стальных элементов]. *Structures*, 2016, no. 5, pp. 76–87.
16. Wang J., Afshan S., Gardner L. Axial behaviour of prestressed high strength steel tubular members [Растяжение-сжатие предварительно напряженных труб из высокопрочной стали]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, no. 133, pp. 547–563.
17. Li P., Wadee M. A., Yu J. et al. Stability of prestressed stayed steel columns with a three branch crossarm system [Устойчивость предварительно напряженных стальных колонн с трехпластинной траверсой]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, no. 122, pp. 274–291.
18. *Серпик И. Н., Курченко Н. С.* Нахождение предельных нагрузок для систем тонкостенных стержней открытого профиля // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 1(37). С. 41–48.
18. Serpik I. N., Kurchenko N. S. Finding ultimate loads for systems of thin-walled open profile bars. *Vestnik Bryansk State Technical University*, 2013, no. 1(37), pp. 41–48. (In Russ.).
19. *Serpik I. N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y.* Mixed Approaches to handle limitations and execute mutation in the genetic algorithm for truss size, shape and topology optimization [Смешанные подходы к учету ограничений и выполнению мутаций в генетическом алгоритме структурно-параметрической оптимизации ферм]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2017, no. 61(3), pp. 471–482.
20. Alekseytsev A. V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions [Механическая безопасность железобетонных каркасов при комбинированных аварийных воздействиях]. *Magazine of Civil Engineering*, 2021, no. 3(103), pp. 10306.