

УДК 004.8

DOI: 10.30987/article_5c3db114b342b8.67667619

И.Н. Серпик

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ ФЕРМ ПО СТРУКТУРЕ И ПАРАМЕТРАМ НА ОСНОВЕ СТРАТЕГИИ ПОИСКА РАБОЧЕГО МЕСТА

Предложен алгоритм структурно-параметрической оптимизации стальных плоских ферм с помощью метаэвристической стратегии поиска рабочего места и генетических операторов мутации, селекции и кроссинговера. Работоспособность и высокая стабильность рассматриваемой

процедуры проиллюстрированы на примере оптимального проектирования двухопорной фермы.

Ключевые слова: оптимизация, несущие системы, метаэвристические алгоритмы, стратегия поиска рабочего места, генетические операторы.

I.I. Serpik

STEEL FLAT TRUSS OPTIMIZATION ON STRUCTURE AND PARAMETERS BASED ON STRATEGY OF WORKPLACE SEARCH

At optimum design of trussed structures with the aid of metaheuristic algorithms the account of limitations is usually realized with the aid of penalties which in many cases results in the conditions distortion of problems under consideration and a considerable instability of solutions obtained. The aim of this work consists in the formation of a metaheuristic procedure of a structural-parametric optimization of steel flat trusses which does not provide for penalty introduction at any stage of a computer circuit.

A problem of truss rods mass minimization is set at limitations on a geometrical invariability, durability, rigidity and object stability. A truss topology and rod profiles are varied within the limits of the method of excess structures. There is offered an algorithm based on the metaheuristic strategy offered before of a workplace search and classic genetic operators.

Введение

Метаэвристические методы широко используются при решении оптимизационных задач механики несущих систем. Для оптимизации ферм достаточно успешную апробацию получили такие метаэвристические подходы, как генетические алгоритмы [1], метод роя частиц [2], поиск гармонии [3], империалистический конкурентный алгоритм [4], алгоритм эхолокации дельфина [5] и др. Достаточно подробные сведения об использовании метаэвристических процедур в оптимизации несущих конструкций изложены в обзоре [6].

An evolutionary search of a structure version satisfying the limitations of the problem at a number of intermediate stages of optimization is foreseen. An auxiliary purposeful function showing the fulfillment degree of conditions on trussed structure working capacity is used.

By the example of the solution of a specific optimization problem for a double-supported truss with the span of 72 m there is shown a high stability of solutions obtained with the aid of the given iteration scheme at the strict fulfillment of limitations set. On the basis of the formation and testing a metaheuristic approach developed there is shown a possibility for efficient use of the strategy of a workplace search in an optimum synthesis of bearing systems.

Key words: optimization, bearing systems, metaheuristic algorithms, strategy of workplace search, genetic operators.

В оптимальном проектировании конструктивных систем приходится учитывать достаточно сложное сочетание ограничений по условиям обеспечения их геометрической неизменяемости, прочности, жесткости и устойчивости. При использовании для таких объектов метаэвристических итерационных схем ограничения обычно принимаются во внимание на основе штрафных функций [6], что во многих случаях приводит к искажению условий задачи и значительной нестабильности получаемых решений. В работе [7] предложен метаэвристический алгоритм для параметрической оптимизации плоских

ферм, основанной на стратегии, инспирированной процессом поиска рабочего места (стратегии ПРМ). Схема оптимального поиска при наличии ограничений ставится в соответствие с возможным поведением человека, ищущего работу с наибольшим окладом при удовлетворении своих предпочтений к условиям труда и требований работодателей. Эта стратегия позволяет эффективно учитывать ограничения без введения штрафных функций. При формировании процедуры оптимизации принимается во внимание, что вычислительные затраты на определение массы конструкции пренебрежимо малы в сравнении с трудоемкостью расчета напряженно-деформированного состояния ферм. Данный подход предусматривает ряд последовательных поисков вариантов (проектов) несущей системы, удовлетворяющих ограничениям задачи, на основе повышения степени работоспособности объекта. В каждом таком поиске учитываются только

Постановка задачи

Рассматриваем задачу оптимизации стальной плоской фермы по топологии конструкции и дискретным множествам поперечных сечений стержней. Полагаем, что ферма раскреплена из своей плоскости по узлам. В стержнях учитываем силы растяжения-сжатия. Будем формировать для объекта некоторую избыточную структуру, управление которой предусматривает возможность введения «нулевых» («отсутствующих») стержней, имеющих относительно малую площадь поперечного сечения. При этом структурно-параметрическая оптимизация фактически сводится к параметрической. Для расчета напряженно-деформированного состояния фермы используем метод конечных элементов (МКЭ) в рамках метода перемещений. Каждый из стержней представляем одним конечным элементом. Ставим задачу минимизации массы M стержней конструкции:

$$M = \rho \sum_{i=1}^{i_0} l_i A_i \Rightarrow \min ,$$

те варианты, масса которых соответствует текущему требованию к минимальному значению этой величины. Как только удастся найти проект, не нарушающий ни одного из ограничений, соответствующая ему масса принимается в качестве минимально требуемой для продолжения процесса оптимизации. Этот проект рассматривается и в качестве текущего результата оптимизации.

В настоящей статье разрабатывается метаэвристический алгоритм, использующий стратегию ПРМ для структурно-параметрической оптимизации стальных ферм. Одновременно варьируются топология и параметры несущей системы в рамках метода избыточных структур. При этом для реализации ряда шагов этой стратегии выполняются генетические операции мутации, селекции и кроссинговера. Проект фермы интерпретируется и как вакансия рабочего места, и как особь популяции.

где ρ – плотность материала стержней; i_0 – число стержней; l_i , A_i – длина и площадь поперечного сечения стержня i .

Поиск осуществляем на дискретных множествах допустимых профилей поперечных сечений стержней. Полагаем, что стержни объединяются в группы, в пределах каждой из которых они имеют одинаковое поперечное сечение. Профиль стержней одной группы рассматриваем как параметр проектирования. В частном случае к группе может быть отнесен только один стержень.

Учитываем следующие ограничения:

1. Геометрическая неизменяемость стержневой системы.

2. Условие по гибкости, прочности и устойчивости стержней с учетом требований стандарта [8]:

$$\Phi_{sb} = \max_{\substack{i=1, \dots, i_0 \\ j=1, \dots, J}} f_{ij} \leq 1, \quad (1)$$

где Φ_{sb} – показатель, характеризующий удовлетворение рассматриваемых ограничений для объекта в целом; J – число нагрузок; f_{ij} – показатель, используемый

для характеристики удовлетворения этих ограничений для стержня i при нагружении j .

$$f_{ij} = \max \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_{i\max}}, \frac{P_{uij}}{\phi_i P_{ni}} \right),$$

где $\lambda_i = k_i l_i / r_i$ – гибкость стержня i ; k_i , r_i – коэффициент его эффективной длины и минимальный радиус инерции поперечного сечения (для ферм можно принимать $k_i = 1$); $\lambda_{i\max}$ – максимально допустимое значение λ_i (при растяжении $\lambda_{i\max} = 300$, при сжатии $\lambda_{i\max} = 200$); P_{uij} – модуль продольной силы в стержне i при нагружении j ; ϕ – коэффициент, принимаемый равным 0,9 при растяжении и 0,85 при сжатии; P_{ni} – предельная сила для стержня i .

3. Условие жесткости:

$$\Phi_\delta = \max_{\substack{l=1,\dots,L \\ r=1,\dots,2 \\ j=1,\dots,J}} \frac{|\delta_{lrj}|}{\delta_{lr}^{\max}} \leq 1, \quad (2)$$

где Φ_δ – число, отражающее удовлетворение ограничений по перемещениям узлов фермы; L – число узлов фермы; $|\delta_{lrj}|$, δ_{lr}^{\max} – модуль перемещения узла l в нагружении j для оси под номером r декартовой системы координат (Ox – ось 1, Oy – ось 2) и максимально допускаемое значение для этого модуля.

При растяжении $P_{ni} = \sigma_\tau A_i$, где σ_τ – предел текучести материала. При сжатии $P_{ni} = \sigma_{cr} A_i$, где σ_{cr} – критическое напряжение для стержня i , зависящее от приведенной предельной гибкости

$$\lambda_c = \frac{k_i l_i}{r_i \pi} \sqrt{\frac{\sigma_\tau}{E}}.$$

Здесь E – модуль упругости материала.

При $\lambda_c \leq 1,5$

$$\sigma_{cr} = 0,658 \lambda_c^2 \sigma_\tau;$$

при $\lambda_c > 1,5$

$$\sigma_{cr} = \frac{0,877}{\lambda_c^2} \sigma_\tau.$$

В соответствии с подходом работы [9] условие геометрической неизменяемости будем сводить к ограничениям по перемещениям. Для этого прежде всего должна быть обеспечена геометрическая неизменяемость базовой конструкции избыточной структуры. Расчеты показывают, что в данном случае при задании фиктивной площади поперечного сечения для «нулевых» стержней фермы в $10^4 \dots 10^6$ раз меньше, чем наименьшее значение этой величины для всех используемых вариантов реальных профилей, обеспечивается как имитация отсутствия этих стержней, так и возможность получения хорошо обусловленной системы разрешающих уравнений для геометрически неизменяемого объекта. Если механическая система становится геометрически изменяемой, то об этом могут свидетельствовать относительно большие фиктивные перемещения, получаемые при формальном решении задачи. В том случае, когда при варьировании структуры стержневой системы окажутся изолированными стержни или группы стержней, решение системы уравнений МКЭ может и не дать больших перемещений, однако такие объекты исключаются в процессе оптимизации как нерациональные.

Интерпретация поиска работы как метаэвристической процедуры

Пусть претендент на рабочее место ставит задачу получить работу с наибольшим окладом F . В качестве дискретного множества, на котором проводится поиск, выступает множество вакансий V . Выделим относительно быстрые действия поиска (изучение объявлений, рассылка резюме, звонки по телефону и т.д.) и требую-

щие существенно бóльших временных затрат действия в формате собеседования (с возможными экзаменами). Полагаем, что в рамках быстрых действий претендент получает информацию для вакансий о значениях F , а также о выполнении части собственных условий и требований работодателей (ограничения по оптимизации T_1).

Проверка по остальным ограничениям, которые будем обозначать T_2 , осуществляется на собеседовании.

Выделим множество $V_1 \subset V$ вакансий, для которых выполняются ограничения T_1 . Пусть на начальном этапе претендент выбирает каким-либо образом ряд вакансий v_i из множества $V_{1A} \subset V_1$, удовлетворяющего по окладу условию $F > F_A$, где F_A – задаваемое значение, которое в дальнейшем может изменяться. Далее для каждого цикла (итерации) стратегии ПРМ предусмотрим следующую последовательность шагов:

Шаг 1. Путем случайных вариаций выполняется замена части из вакансий v_i с соблюдением для новых вакансий требования $v_i \in V_{1A}$.

Шаг 2. Для рассматриваемой группы вакансий проверяется удовлетворение

Алгоритм решения задачи

С точки зрения поставленной задачи оптимизации фермы полагаем, что $F = 1/M$; вакансия – это набор значений параметров варианта особи; ограничения T_1 учитываются при задании дискретных множеств допустимых профилей стержней и обеспечении условия $F > F_A$; T_2 – это проверка удовлетворения неравенств (1) и (2). Стратегия ПРМ может предусматривать использование различных подходов для реализации отдельных ее шагов. Сформулируем алгоритм, основанный на этой стратегии и технике генетических операторов.

Будем оперировать с основной популяцией Π размером N_Π и вспомогательной элитной популяцией Ψ , размер которой зависит от результатов итерационного процесса, но не превышает величины N_Ψ . Первоначально задаем $F_A = 0$, популяцию Π формируем из максимальных по порядковому номеру профилей во множествах допустимых поперечных сечений стержней, а популяцию Ψ оставляем на этом этапе пустой. Шаги стратегии ПРМ реали-

условий T_2 . Если для какой-либо вакансии v_i эти условия выполняются, принимается $F_A = F_i$, где F_i – значение оклада для этой вакансии.

Шаг 3. По результатам собеседований осуществляется оценка степени профессиональной пригодности претендента по отношению к вакансиям v_i . На основе этих результатов из множества V_{1A} выбирается группа вакансий v_i^c , близкая к тем вакансиям v_i , для которых профессиональная пригодность будет наибольшей.

Шаг 4. Для вакансий v_i^c осуществляются операции шага 2.

Итогом поиска для текущей итерации является особь, соответствующая последнему из найденных на шагах 2 или 4 значений F_A .

уем в каждой итерации $s \geq 1$ таким образом:

Шаг 1. Выполняется мутация для особей популяции Π с использованием схемы работ [9; 10]. Если номер итерации больше некоторого числа s_1 , то эта процедура реализуется для случайно выбранных $n_1 = \max(1, \lfloor \lambda n_o \rfloor)$ параметров в каждой особи популяции, где λ – задаваемое значение на отрезке $(0 \leq \lambda < 1)$, n_o – общее число параметров. При $s \leq s_1$ число n_1 может приниматься бóльшим путем умножения λ на число d ($1 < d \leq \lfloor n_o/n_1 \rfloor$). Для каждого параметра, подлежащего изменению, выбирается величина p_a на отрезке $[0, 1]$ с помощью генератора случайных чисел с равномерным законом распределения и сравнивается с величиной m_a ($0 < m_a < 1$). Если $p_a > m_a$, может быть с равной вероятностью выбрано любое из допустимых значений параметра, иначе номер позиции параметра во множестве допустимых вариантов назначается путем случайного изменения его текущего значения на 1-2 единицы. Операция мутации для особи

может выполняться многократно до тех пор, пока не будет удовлетворено условие $F_i \geq F_A$.

Шаг 2:

2а. Проверяется выполнение ограничений T_2 для особей популяции П. Для этого определяется величина коэффициента профессиональной пригодности каждой i -й особи с точки зрения стратегии ПРМ:

$$k_p = \frac{1}{\max(\Phi_{cb}, \Phi_\delta)}.$$

При достижении условий $k_p \geq 1$ и $F_i > F_A$ следует назначить новую величину $F_A = F_i$.

2б. В популяцию Ψ последовательно добавляется каждая из особей i популяции П, которая больше по значению k_p наихудшей особи популяции Ψ , и набор значений генов особи i отсутствует в этой популяции. Если размер популяции Ψ становится равным $N_\Psi + 1$, то вариант проекта с наименьшим значением k_p из нее исключается.

2с. Осуществляется проверка особей популяции Ψ на выполнение условия $F_i \geq F_A$. Если это условие не выполняется, то особь удаляется из базы. Если на этапе 2а было изменено значение F_A , то на данном этапе в базе Ψ могут остаться только особи, соответствующие условию $F_i = F_A$.

Шаг 3. Реализуются операции селекции и одноточечного кроссинговера. Более приспособленными считаются те особи, у которых коэффициент k_p имеет большее значение. При выборе пар особей используется метод рулетки с определением для

Пример оптимизации фермы

Проиллюстрируем работоспособность рассматриваемого алгоритма на тестовом примере стальной плоской фермы на двух шарнирно-неподвижных опорах. Избыточная структура фермы приведена на рис. 2. Рассматривается нагружение объекта системой сил $P=20$ кН, $F=60$ кН и силами тяжести, зависящими от варьируемых параметров и приводимыми к узловым точкам.

особи i длины участка на отрезке $[0; 1]$ таким образом:

$$\Delta_i = t_i / \sum_{n=1}^{N_\Pi} t_n,$$

где $t_n = \alpha k_{pn}^\beta$; k_{pn} – значение k_p для особи n ; α, β – задаваемые константы.

Шаг 4:

4а. Реализуются операции шага 2 на основе популяции П, полученной по результатам кроссинговера. В данном случае при пополнении базы Ψ из базы П выполняется дополнительная проверка удовлетворения для особи условия $F_i \geq F_A$, так как кроссинговер может вызвать его нарушение.

4б. Проверяется выполнение условия $F_i \geq F_A$ для всех особей популяции П. Если для рассматриваемой особи данное требование нарушается, она заменяется лучшей из особей, помещенных в популяцию Ψ , при условии ее отсутствия в популяции П. Если такой особи нет, то для замены используется особь, задаваемая путем случайного выбора значений варьируемых параметров.

Блок-схема данного алгоритма представлена на рис. 1, где s_o – задаваемое общее число итераций, $k_{p\min}$ – наименьшее в текущем состоянии значение k_p для особей популяции Ψ . Исследование работоспособности предлагаемой итерационной процедуры показало, что для нее целесообразно принимать $N_\Pi = 15 \dots 25$; $N_\Psi = 10 \dots 20$; $\alpha = 0,05 \dots 0,15$; $\beta = 100 \dots 150$; $m_a = 0,9$; $\lambda = 0,1 \dots 0,2$; $s_1 = \theta n n_o$; $d = 3 \dots 6$; $\theta = 0,2 \dots 0,5$.

Задавалось:

$$E = 2,08 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$\delta_{ir}^{\max} = 0,24 \text{ м } (r=1, 2).$$

$$\sigma_T = 225 \text{ МПа};$$

$$\rho = 7850 \text{ кг/м}^3;$$

Выполнялось условие обеспечения симметрии конструкции. Профили стержней объединялись в 16 групп (рис. 2). Для каждой из групп принимались для выбора 37 вариантов круглых труб в соответствии

со стандартом [8] (таблица) и возможность исключения из структуры. В таблице k – номер профиля; A_k , r_k – площадь и радиус инерции поперечного сечения k -го профиля; профили отсортированы по значениям радиусов инерции. По такому же принципу формировались множества допустимых профилей при реализации алгоритма. Оптимальный поиск выполнялся при

$N_{\Pi} = N_{\Psi} = 20$; $\alpha = 0,1$; $\beta = 120$; $\lambda = 0,1$; $d=5$; $\theta = 0,3$. Так как в этой ферме стержни нижнего пояса являются растянутыми и не предусматривают проверку по условиям устойчивости, в процессе эффективной оптимизации должны быть устранены из структуры ненагруженные стойки, входящие в группы 7, 10, 11.



Рис. 1. Блок-схема решения задачи на основе стратегии ПРМ

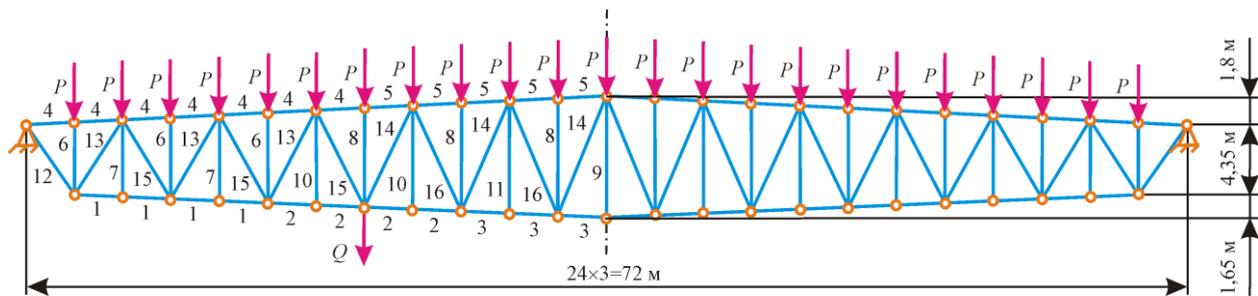


Рис. 2. Ферма с избыточной структурой: 1-16 – номера групп стержней

Таблица

Допустимые поперечные сечения круглых труб

k	Обозначение профиля	$A_k, \text{см}^2$	$r_k, \text{см}$	k	Обозначение профиля	$A_k, \text{см}^2$	$r_k, \text{см}$
1	PX0.5	2,06	0,635	20	PX3.5	23,74	3,327
2	P0.5	1,61	0,663	21	P3.5	17,29	3,404
3	PX0.75	2,79	0,815	22	PXX4	52,26	3,480
4	P0.75	2,15	0,848	23	PX4	28,45	3,759
5	PX1	4,12	1,034	24	P4	20,45	3,835
6	P1	3,19	1,069	25	PXX5	72,90	4,369
7	PX1.25	5,68	1,331	26	PX5	39,42	4,674
8	P1.25	4,32	1,372	27	P5	27,74	4,775
9	PX1.5	6,90	1,537	28	PXX6	100,64	5,232
10	P1.5	5,15	1,582	29	PX6	54,19	5,563
11	PXX2	17,16	1,786	30	P6	36,00	5,715
12	PX2	9,55	1,946	31	PXX8	137,42	7,010
13	P2	6,90	1,999	32	PX8	82,58	7,315
14	PXX2.5	26,00	2,144	33	P8	54,19	7,468
15	PX2.5	14,52	2,347	34	PX10	103,87	9,220
16	P2.5	10,97	2,405	35	P10	76,77	9,322
17	PXX3	35,29	2,667	36	PX12	123,87	10,998
18	PX3	19,48	2,896	37	P12	94,19	11,125
19	P3	14,39	2,946				

Осуществлялось 10 независимых запусков процесса оптимизации с выполнением по 8000 итераций. Группы 7, 10 и 11 стержней не вошли в конструкцию фермы ни в одном из запусков. Получившиеся значения M располагались в достаточно узком интервале [7759,2; 7771,1] кг. При этом в 8 запусках было достигнуто наименьшее из найденных в численных экспериментах значение целевой функции. Проверки показали, что полученные при оптимизации варианты конструкции строго удовлетворяют

поставленным ограничениям. Сходимость для наилучшего и наихудшего запусков с точки зрения скорости достижения наименьшей для данного запуска величины M отражена на рис. 3, подготовленном с помощью свободно распространяемой версии программы для работы с графиками Advanced Grapher. На рис. 4 представлена полученная структура и номера профилей конструктивных элементов для варианта несущей системы с наименьшей суммарной массой стержней.

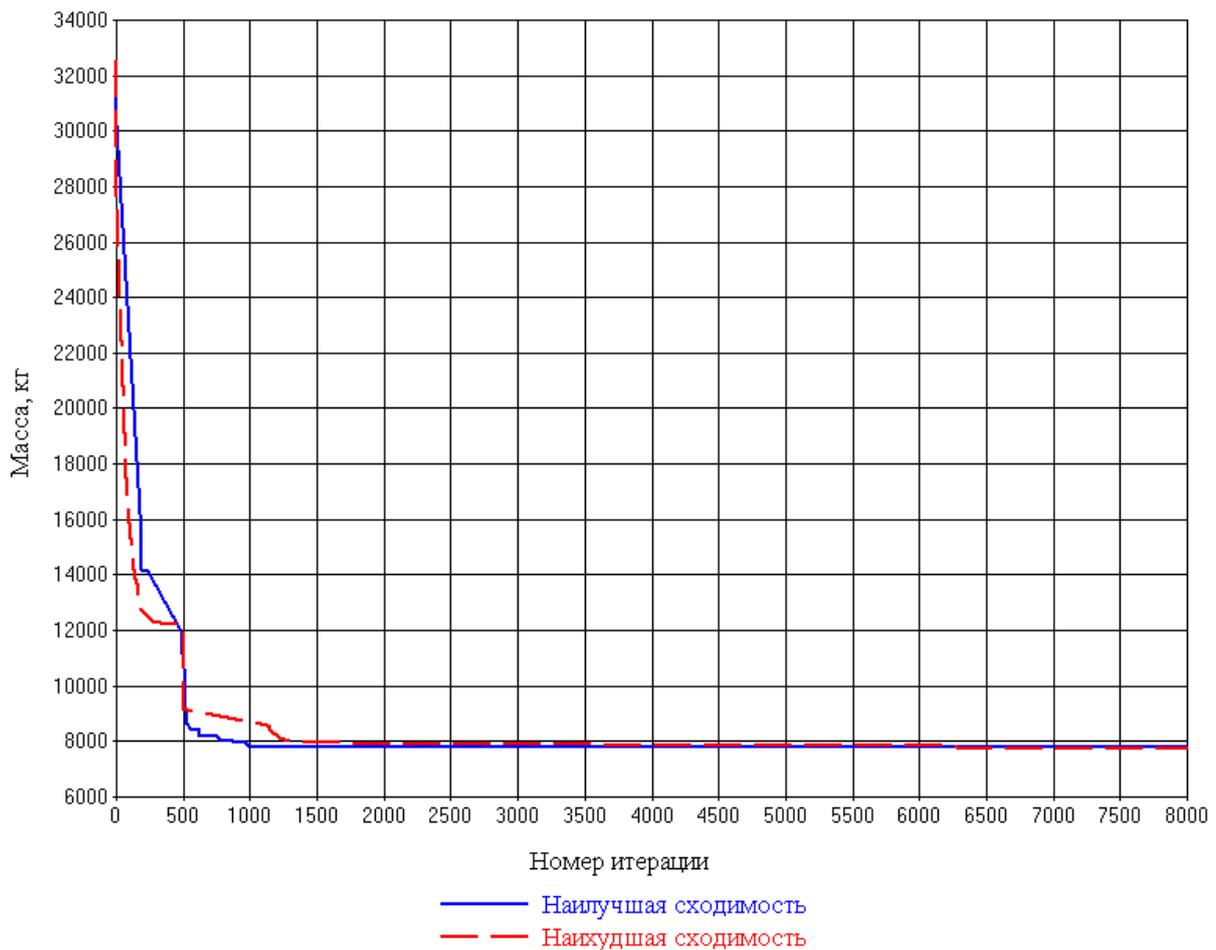


Рис. 3. Графики сходимости итерационного процесса

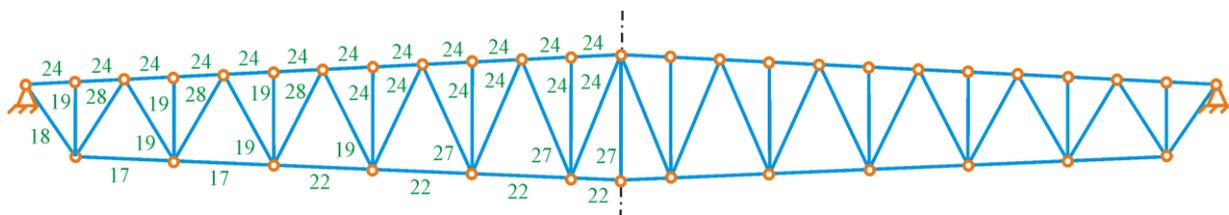


Рис. 4. Результат оптимизации по структуре и номерам профилей стержней

Вывод

Предложенный алгоритм позволяет реализовывать метаэвристическую схему оптимизации ферменных стальных конструкций по структуре и параметрам, не предусматривающую использование штрафных функций для учета ограничений. При этом обеспечивается строгое выполнение условий геометрической неизменяемо-

сти, прочности, жесткости и устойчивости для всех получаемых вариантов несущей системы. На примере решения конкретной оптимизационной задачи для двухопорной фермы проиллюстрирована высокая стабильность решений, получаемых с помощью данной итерационной процедуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-00567 «Оптимизация несущих систем по топологии, параметрам, режимам многократного предварительного напряжения и последовательности приложения полезных нагрузок».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nanakorn, P. An adaptive penalty function in genetic algorithms for structural design optimization / P. Nanakorn, K. Meesomklin // Computers and

Structures. – 2001. – Vol. 79. – № 29-30. – P. 2527-2539.

2. Perez, R.E. Particle swarm approach for structural design optimization / R.E. Perez, K. Behdinan // *Computers and Structures*. – 2007. – Vol. 85. – P. 1579-1588.
3. Lee, K.S. The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization / K.S. Lee, Z.W. Geem, S.-H. Lee, K.-W. Bae // *Engineering Optimization*. – 2005. – Vol. 37. – № 7. – P. 663-684.
4. Kaveh, A. Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm / A. Kaveh, S. Talatahari, // *Computers and Structures*. – 2010 – Vol. 88. – №21-22. – P. 1220-1229.
5. Kaveh, A. A new optimization method: Dolphin echolocation / A. Kaveh, N. Farhoudi // *Advances in Engineering Software*. – 2013. – Vol. 59. – P. 53-70.
6. Stolpe, M. Truss optimization with discrete design variables: A critical review / M. Stolpe // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2016. – Vol. 53. – № 2. – P. 349-374.
7. Серпик, И.Н. Стратегия метаэвристической оптимизации несущих конструкций, инспириро-

1. Nanakorn, P. An adaptive penalty function in genetic algorithms for structural design optimization / P. Nanakorn, K. Meesomklin // *Computers and Structures*. – 2001. – Vol. 79. – № 29-30. – P. 2527-2539.
2. Perez, R.E. Particle swarm approach for structural design optimization / R.E. Perez, K. Behdinan // *Computers and Structures*. – 2007. – Vol. 85. – P. 1579-1588.
3. Lee, K.S. The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization / K.S. Lee, Z.W. Geem, S.-H. Lee, K.-W. Bae // *Engineering Optimization*. – 2005. – Vol. 37. – № 7. – P. 663-684.
4. Kaveh, A. Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm / A. Kaveh, S. Talatahari, // *Computers and Structures*. – 2010 – Vol. 88. – №21-22. – P. 1220-1229.
5. Kaveh, A. A new optimization method: Dolphin echolocation / A. Kaveh, N. Farhoudi // *Advances in Engineering Software*. – 2013. – Vol. 59. – P. 53-70.
6. Stolpe, M. Truss optimization with discrete design variables: A critical review / M. Stolpe // *Structural*

ванная поиском работы / И.Н. Серпик // *Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики: материалы 7-й науч.-практ. интернет-конф.* – Тольятти, 2016. – С. 40-43. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_25678372_47_033212.pdf (дата обращения: 15.08.2018).

8. Load and Resistance Factor Design (LRFD). Vol. 1. Structural Members Specifications Codes. – 3rd ed. – American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois, 2001.
9. Serpik, I.N. Mixed approaches to handle limitations and execute mutation in the genetic algorithm for truss size, shape and topology optimization / I.N. Serpik, A.V. Alekseytsev, P.Y. Balabin // *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*. – 2017. – Vol. 61. – № 3. – P. 471-482.
10. Serpik, I.N. Optimization of flat steel frame and foundation posts system / I.N. Serpik, A.V. Alekseytsev // *Magazine of Civil Engineering*. – 2016. – № 1. – P. 14–24.

and Multidisciplinary Optimization. – 2016. – Vol. 53. – № 2. – P. 349-374.

7. Serpik, I.N. Strategy of metaheuristic optimization of bearing structures caused by work search / I.N. Serpik // *Inter-Subject Investigations in the Field of Mathematical Modeling and Informatics: Proceedings of the 7th Scientific- Pract. Internet-Conf.* – Togliatti, 2016. – pp. 40-43. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_25678372_47_033212.pdf (address date: 15.08.2018).
8. Load and Resistance Factor Design (LRFD). Vol. 1. Structural Members Specifications Codes. – 3rd ed. – American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois, 2001.
9. Serpik, I.N. Mixed approaches to handle limitations and execute mutation in the genetic algorithm for truss size, shape and topology optimization / I.N. Serpik, A.V. Alekseytsev, P.Y. Balabin // *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*. – 2017. – Vol. 61. – № 3. – P. 471-482.
10. Serpik, I.N. Optimization of flat steel frame and foundation posts system / I.N. Serpik, A.V. Alekseytsev // *Magazine of Civil Engineering*. – 2016. – № 1. – P. 14–24.

Статья поступила в редакцию 7.09.18.

*Рецензент: д.т.н., доцент Брянского государственного
Инженерно-технологического университета*

Кисель Ю.Е.

Статья принята к публикации 25.12.18.

Сведения об авторах:

Серпик Игорь Нафтольевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Прикладная механика и физика» Брянского государственного инженерно-технологического университета, e-mail: inserpik@gmail.com.

Serpik Igor Naftolievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. “Applied Mechanics and Physics”, Bryansk State Technical University, e-mail: inserpik@gmail.com.