

## Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней

*К.т.н., доцент А.В. Алексейцев\**

*ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия»*

**Ключевые слова:** эволюционное моделирование; элитизм; параметрическая оптимизация; фермы; генетические операторы; слабовзаимодействующие популяции; конечно-элементный расчет; парные уголки; узловые соединения

В настоящее время генетические алгоритмы применяются для решения некоторых задач оптимизации строительных конструкций. Прежде всего, это параметрический синтез, в результате которого реализуется минимизация массы деформируемых объектов [1–9]. Также известны подходы, где наряду с параметрической оптимизацией выполняются синтез рациональной топологии стержневых систем [7, 10–12], поиск предельной нагрузки [7, 13], многоцелевая оптимизация деформируемых объектов [14, 15]. Для получения высокопроизводительных итерационных схем используются параллельно эволюционирующие популяции [1, 12], высокоуровневые генетические операторы [8], применяются штрафные функции [2, 7, 15–17] и другие процедуры.

В большинстве известных подходов к эволюционной оптимизации не в полной мере учитываются особенности изготовления конструкций, в частности, устройство узловых соединений. Анализ технологии производства ферм, синтезированных только на основе минимума массы стержней, показал, что некоторые такие объекты нерационально применять из-за большого расхода материала и значительных затрат труда, требуемого для устройства узлов, удорожания конструкции ввиду увеличения отходов металла. В данной статье описан процесс построения генетического алгоритма параметрической оптимизации ферм с возможностью учета стоимости устройства узловых соединений.

### 1. Общая постановка задачи

Будем рассматривать линейно-деформируемую стержневую ферму, для которой сформирована следующая функция цели:

$$C = C_M + C_T \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $C$  – плановая себестоимость конструкции;  $C_M$  – стоимость материала стержней фермы;  $C_T$  – стоимость узловых соединений. Считаем, что конструкция эксплуатируется в нормальных условиях и относится к первому классу напряженно-деформированного состояния (п. 4.2.7 [20]), при котором пластические деформации в конструктивных элементах и узлах их соединений не учитываются.

При параметрической оптимизации для рассматриваемой конструкции значение  $C_M$  можно записать в виде:

$$C_M = f(\{T\}, \{X\}, \{Y\}, \{Z\}), \quad (2)$$

где  $\{T\}$  – дискретные множества допустимых для выбора профилей стержней, задаваемые интегральными геометрическими характеристиками сечений;  $\{X\}, \{Y\}, \{Z\}$  – множества варьируемых координат узлов в декартовой системе осей  $Oxuz$ .

$$C_T = f(\{N\}, \{\alpha\}), \quad (3)$$

где  $\{N\}$  – значения векторов расчетных продольных усилий в стержнях;  $\{\alpha\}$  – множество углов между продольными осями стержней.

Учитываются следующие ограничения:

- 1) геометрическая неизменяемость стержневой системы.
- 2) равновесие узлов конечно-элементной модели объекта [18]:

$$[K]\delta_i = R_i, \quad i = 1 \dots n, \quad (4)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости конечно-элементной модели объекта;  $\delta_i$ ,  $R_i$  – векторы перемещений и узловых сил  $i$ -го нагружения;  $n$  – число вариантов нагружений;

- 3) условия прочности и устойчивости стержней, условие жесткости конструкции в соответствии с нормами [19, 20];
- 4) общая устойчивость конструкции.

## 2. Оптимизационная процедура

Рассмотрим построение итерационной схемы для плоских ферм. Каждый вариант фермы представляем в виде особи, состоящей из одной хромосомы (строковой переменной), содержание которой определяется значениями варьируемых параметров  $\{T\}, \{X\}, \{Y\}$ . Процесс решения задачи формируем по принципу функционирования генетической итерационной схемы работы [8]. Отличие предлагаемого алгоритма состоит в том, что в процедуре параметрического синтеза решается задача (1) и реализуются некоторые принципы алгоритма слабозаимодействующих популяций [12].

Определим популяции, используемые в итерационной схеме. Под популяцией понимаем группу вариантов конструкций (особей), которые рассматриваются на каждой итерации алгоритма (в каждом поколении). Популяция П1 – группа особей, формируемая в каждой итерации на основе генетических операторов. Под генетическими операторами понимаем процедуры, реализующие обмен генами (значениями параметров) или изменения генов для особей. Популяция П2 – группа особей, имеющих лучшие (элитные) значения  $C$  и удовлетворяющих всем ограничениям. Популяция П3 – группа, содержащая особи, имеющие элитные значения  $C_M$ . Популяции П1, П2 и П3 эволюционируют параллельно. Приведем на рисунке 1 блок-схему алгоритма оптимизации и поясним содержание приведенных на ней элементов.

В блоке 1 задается информация о конечно-элементной модели деформируемого объекта (топология объекта, характеристики материалов, сведения о нагружениях, кинематических ограничениях). Формируются данные о варьируемых параметрах, ограничениях по прочности и устойчивости стержней, ограничениях по жесткости конструкции.

В блоке 2 для каждой особи в популяции случайным образом выбираются значения варьируемых параметров  $\{T\}, \{X\}, \{Y\}$ . Для одной из особей назначаются максимальные по модулю значения параметров. Эта операция выполняется во избежание известной проблемы возникновения «пустых» популяций.

В блоке 3 формируется популяция П1, подлежащая расчету и проверке ограничений в каждом поколении (итерации) алгоритма. Формирование особей этой популяции на первой итерации происходит путем их копирования из популяции блока 2, а на второй и последующих итерациях – путем реализации процедур блока 9.

В блоке 4 для особей популяции П1 реализуется расчет конструкций по методу конечных элементов [18]. Для варианта несущей системы выполняется построение матрицы жесткости, после чего при помощи разложения Холецкого решается система уравнений (4). После вычисления перемещений, усилий и напряжений в конструктивных элементах проверяются ограничения 2 и 3. Если конструкция удовлетворяет всем ограничениям, то она считается работоспособной и принимается для дальнейшего анализа. Для каждого варианта объекта здесь вычисляется масса стержней  $C_M$ .

Блоки 5 и 7 содержат процедуры редактирования популяций в соответствии с принципом сохранения лучшего решения («элитизма»). Этот принцип состоит из проверки двух условий:

- для данной особи в элитной популяции не должно существовать такой же особи;
- для данной особи величина целевой функции не должна превышать максимальной величины целевой функции для объектов, уже находящихся в популяции.

Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней

Если эти условия удовлетворены, то данная особь включается в элитную популяцию. Если число особей в ней превышает некоторую максимально допустимую величину, то объект с наихудшим значением целевой функции из нее исключается.

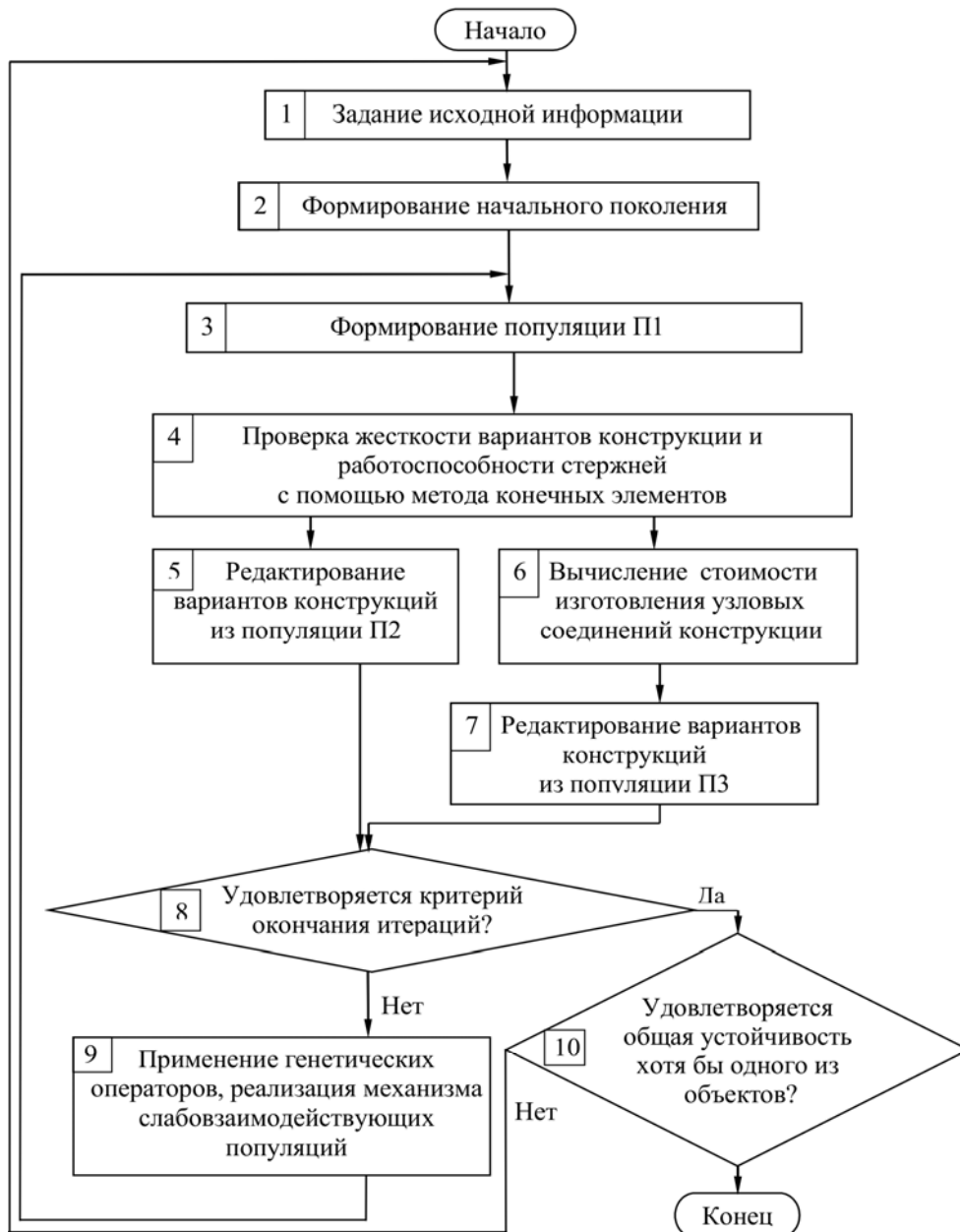


Рисунок 1. Блок-схема процесса оптимизации

В блоке 6 для каждой работоспособной особи популяции П1 вычисляется стоимость изготовления конструкции  $C_T$ , включающая устройство узловых соединений и учитывающая специфику технологии производства конструкции. Значение  $C_T$  для фермы из парных уголков, соединяемых на сварных фасонках, можно представить в виде:

$$C_T = C_{m,св} + C_p + C_{yг} + C_n, \quad (5)$$

где  $C_{m,св}$  – стоимость сварочных материалов и работ при устройстве узловых соединений;  $C_p$  – стоимость разметки и резки стержней с профилями из парных уголков;  $C_{yг}$  – стоимость соединения угловых профилей по длине планками;  $C_n$  – стоимость накладок и материалов для их соединения в монтажных узлах.

Величину  $C_{м,св.}$  учитываем выражением

$$C_{м,св.} = C_w \sum_{i=1}^n l_{wi} + \sum_{j=1}^m C_{\phi j} (m_{\phi j} - km_o), \quad (6)$$

где  $C_w$  – стоимость единицы длины сварного шва;  $l_{wi}$  – длина сварных швов, определяемая по формулам норм [5] в зависимости от величины продольных сил в стержнях;  $C_{\phi j}$  – стоимость единицы массы материала фасонки  $j$ ;  $m_{\phi j}$  – масса фасонки  $j$ ;  $n$  – число свариваемых участков;  $m$  – число узлов фермы;  $k$  – коэффициент, учитывающий снижение стоимости листового металла, идущего в отходы;  $m_o$  – масса отходов металла.

Величину  $C_p$  приближенно можно вычислить по формуле:

$$C_p = \sum_{ip=1}^{np} c_i n_{ip} h_{ip} + \sum_{ip=1}^{np} c_{ip} l_{ip}, \quad (7)$$

где  $c_i$  – стоимость резки единицы длины профиля;  $n_{ip}$  – число угловых профилей  $ip$ -го типоразмера в сечении стержня;  $h_{ip}$  – высота профиля  $ip$ -го типоразмера;  $c_{ip}$  – стоимость разметки единицы длины профиля стержня;  $l_{ip}$  – длина профиля, подлежащего разметке;  $np$  – число стержней.

Определяем стоимость соединения стержней планками:

$$C_{y2} = 4k_p \sum_{i=1}^{np} \left( \frac{l_i l_{pi}}{l_{npi}} \right) + C_{nl}, \quad (8)$$

где  $k_p$  – коэффициент, учитывающий стоимость сварки одной планки;  $l_{npi}$  – шаг планок, выбираемый для стержня  $i$ ;  $l_{pi}$  – размер планки, вдоль которого выполняется сварка с профилем;  $l_i$  – длина стержня фермы;  $C_{nl}$  – стоимость всех соединительных планок.

Величина  $C_n$  рассчитывается следующим образом:

$$C_n = C_w \sum_{im=1}^{nm} l_{w,im} + \sum_{q=1}^{nn} C_{nq} (m_{nq} - km_o) + \sum_{im=1}^{nm} (C_{\delta,im} + \tilde{C}_{\delta,im}), \quad (9)$$

где  $l_{w,im}$  – длина сварных швов накладок, устанавливаемых в монтажном узле;  $nm$  – число монтажных узлов;  $C_{nq}$  – стоимость единицы массы накладки  $q$ ;  $m_{nq}$  – масса накладки  $q$ ;  $nn$  – число всех накладок;  $C_{\delta,im}$  – стоимость монтажных болтов, шайб и гаек, устанавливаемых в узле;  $\tilde{C}_{\delta,im}$  – стоимость установки болтов.

Рассчитанные в блоке 4 и 6 конструкции проходят проверку в блоках 5, 7 и в зависимости от значений целевых функций  $C$  и  $C_M$  далее помещаются в популяции П2 и П3 соответственно.

Блок 8. В качестве критерия остановки итераций принимаем условия отсутствия изменений в популяциях П2 и П3 на протяжении 300 поколений [7].

В блоке 9 реализованы высокоуровневые генетические операторы селекции, кроссинговера и мутации, описанные в работе [8]. Селекция выполняется для  $Q/2$  пар особей методом рулетки. Оператор мутации реализуется для каждого выбранного при селекции варианта конструкции. Кроссинговер и мутация реализуются по многоточечным схемам.

Популяции П1–П3 функционировали в итерационном процессе в соответствии с принципами алгоритма слабозаимодействующих популяций, подробно рассмотренного в работе [12]. Обмен особями осуществлялся между популяциями П1, П2 и П1, П3. Взаимодействие между популяциями заключалось в следующем:

- в каждом десятом поколении в качестве родительских особей для кроссингвера выбиралось по одной особи из каждой элитной популяции;
- для реализации мутации в каждом пятнадцатом поколении в популяцию П1 включалось по две особи, выбираемые из популяций П2 и П3.

В рамках блока 10 на основе метода конечных элементов анализируется общая устойчивость для объектов, вошедших в популяции П2 и П3. Если условие выполнено, то вариант конструкции рассматривается как результат решения задачи.

### 3. Учет узловых соединений

Для каждой сформированной в итерационном процессе конструкции выполняется ряд этапов.

1. Вычисляются длины всех стержневых элементов. Формируются базы стоимости резки и разметки стержневых элементов в зависимости от типоразмеров, используемых в генетическом алгоритме.

2. Формируется список номеров стержневых элементов, сходящихся в каждом узле. Нумерация делается в направлении обхода по часовой стрелке, начиная с левой стороны от узла. Создаются базы данных, включающие величины толщин уголков и значения  $h_i, z_i$  для каждого  $i$ -го стержня (см. рис. 2). Далее для каждого из узлов выполняются этапы 3–7.

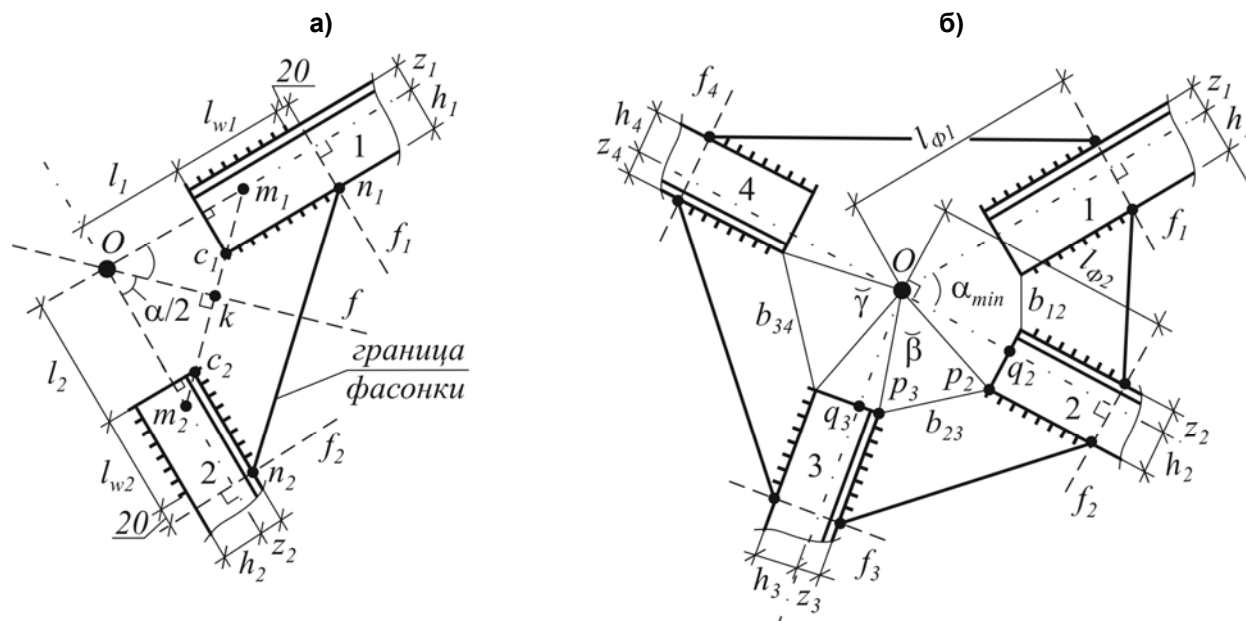


Рисунок 2. Пример компоновки узла, в котором сходятся четыре стержня:

- а) схема размещения на фасонке первой пары стержней;  
 б) схема к определению расположения остальных стержней

3. Вычисляются величины углов множества  $\{\alpha\}$  между осями соседних стержней, сходящихся в узле. Вычисляются вспомогательные углы, определяющие положение первого и последнего стержня относительно горизонтальной оси конструкции.

4. На площади фасонки размещаются стержни. Присоединение нового стержня к последующим выполняется в направлении по часовой стрелке. Первая пара стержней, образующих минимальный угол  $\alpha_0$  из множества  $\{\alpha\}$ , размещается по схеме, показанной на рисунке 2а. Задается минимальная величина  $b_{\min}$  сближения угловых профилей друг с другом. Для двух соседних стержней, показанных на рисунке 2а,  $b_{\min} = c_1 c_2$ . На основе  $b_{\min}$

Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней

вычисляются расстояния  $l_1$  и  $l_2$  от торцов каждого из уголков до точки пересечения продольных осей рассматриваемых стержней. Вычисление величин  $l_1$  и  $l_2$  выполняется при условии, что треугольник  $Om_1m_2$  равнобедренный, а профили размещены с обязательным выполнением условия  $(c_1 \in m_1m_2) \wedge (c_2 \in m_1m_2)$ . Размещение других стержней поясним на примере стержня 3, показанного на рисунке 2б. Проводятся отрезки  $Op_2$  и  $Op_3$ , при этом первоначально принимается  $Op_2 = Op_3$ . С использованием треугольников  $Op_3q_3$  и  $Op_2q_2$  вычисляется угол  $\beta$ . Из треугольника  $Op_2p_3$  по теореме косинусов вычисляется величина  $b_{23}$ . Эта величина сравнивается с  $b_{\min} = b_{12}$ . Если  $b_{\min} \leq b_{23} \leq 1,2b_{\min}$ , то переходим к размещению следующего стержня.

Если неравенство не выполняется, то реализуется алгоритм одномерного поиска при  $b_{23} \rightarrow \min$ . Для этого изменяется длина отрезка  $Op_3$  с постоянным шагом  $\Delta h = 0,1b_{\min}$ . Аналогично присоединяется последний стержень, для которого реализуется поиск минимальной величины  $b_{34}$ .

5. Для каждого из стержней в зависимости от толщины  $t$  профиля уголка задается катет сварных швов, прикрепляющих стержень к фасонке. Учитываются рекомендации норм [20].

$$k_f = \begin{cases} t, & \text{при } t < 12\text{мм} \\ 0,6t, & \text{при } t \geq 12\text{мм} \end{cases}$$

При автоматическом режиме сварки общую длину сварных швов, необходимых для прикрепления стержня к фасонке, определяем из условий [20]:

$$l_w = \max\{l_{w1}; l_{w2}\} + 20; \quad l_{w1} = N / (\beta_f k_f R_{wf} \gamma_c); \quad l_{w2} = N / (\beta_z k_z R_{wz} \gamma_c);$$

$$\beta_f = \begin{cases} 0,9, & \text{при } k_f < 8\text{мм} \\ 0,8, & \text{при } 9 \leq k_f \leq 12\text{мм} \\ 0,7, & \text{при } k_f > 12\text{мм} \end{cases}; \quad \beta_z = \begin{cases} 1,05, & \text{при } k_f \leq 8\text{мм} \\ 1, & \text{при } k_f > 8\text{мм} \end{cases}$$

6. Для каждого стержня определяется расстояние от геометрического центра узла до прямой  $f_i$ , перпендикулярной оси  $i$ -го стержня:  $l_{\phi i} = l_{wi} + l_i + 20$  (см. рис. 2б).

7. Определяются координаты точек  $n_i$  очертания фасонки. Полученные точки соединяются отрезками, определяющими форму фасонки. В соответствии с рекомендациями серии 1.460.2-10/88.1 назначается ее толщина и вычисляется масса  $m_\phi$ .

8. Определяется суммарная длина всех сварных швов фермы и расход листового металла на фасонки.

9. Определяется величина  $C_T$  для всей конструкции.

Стоимости резки, разметки и сварки должны приниматься с учетом трудоемкости этих процессов по данным заводов-изготовителей.

#### 4. Пример решения задачи

Необходимо запроектировать рациональную несущую систему подстропильной фермы из парных уголков. Допускаемые максимальные габаритные размеры фермы, расположение и величина нагрузки принимались в соответствии с рекомендациями серии 1.460.2-10/88.1. Плановая себестоимость вычислялась при использовании расценок, осредненных по данным организаций-изготовителей в Брянске (ООО «Металлоконструкции», ОАО «Брянский завод металлоконструкций и технологической оснастки», ИП Савчук М.И.) на уровень цен января 2012 года. Данные о рыночной стоимости сварки и обработки металлов представлены в таблицах 1, 2.



Таблица 1. Средняя рыночная стоимость обработки конструкционных сталей

Толщина разрезаемого металла $t$ , мм	Плазменная резка, руб./м	Газовая резка, руб./м	Гильотинная рубка листов, руб./удар	Вырезание контура, руб./м	Пробивка отверстия
3	22.50	—	2	37.5	7.5
4	30.00	—	2.5	50	10
5	37.50	—	3	62.5	12.5
6	45.00	38.40	4	75	15
8	60.00	51.20	5	100	20
10	75.00	64.00	6	125	25
12	90.00	76.80	8	150	30
14	105.00	89.60	10	175	35
16	120.00	102.40	—	200	40
20	150.00	128.00	—	250	50
25	187.50	160.00	—	312.5	62.5
30	—	192.00	—	375	75
40	—	256.00	—	500	100
50	—	320.00	—	625	125

Таблица 2. Средняя рыночная стоимость сварочных работ

Тип сварки	Стоимость нахлесточного соединения, руб./см	Стоимость стыкового шва, руб./см
Аргонно-дуговая сварка постоянным током	25	25
Сварка полуавтоматическая, точечная сварка	18	20
Сварка ручная, штучными электродами	15	20

Считаем, что узлы фермы закреплены от перемещений из ее плоскости, а в опорные узлы вводятся шарнирно-неподвижные связи. Верхний пояс фермы по технологическим требованиям принимаем прямолинейным. Каждый узел верхнего пояса, кроме крайних узлов, загружен системой сил  $P$ , при этом в крайние его узлы приложена сила  $P/2$ , а в средний узел –  $8P$ . Исходная ферма показана на рисунке 3.

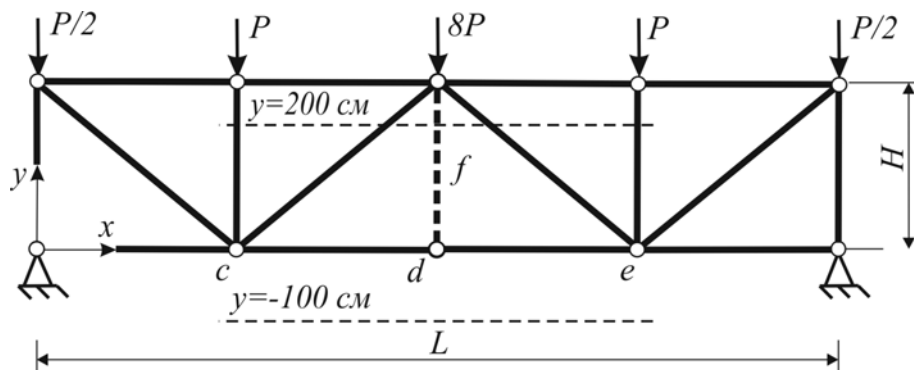


Рисунок 3. Исходные данные задачи параметрического синтеза конструкции

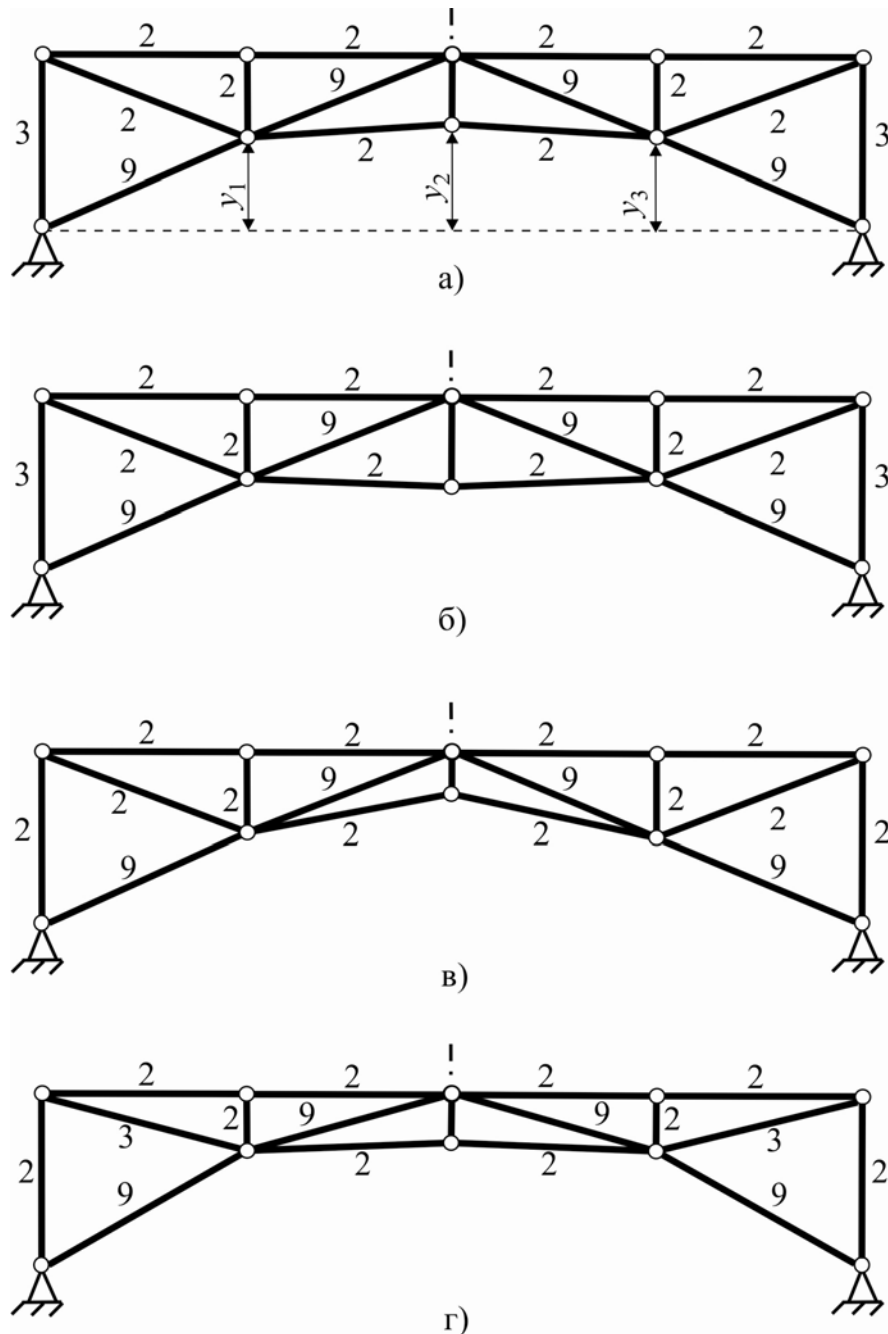
Задавались:  $L=1200$  см;  $H=313$  см;  $P=100$  кН. Материал стержней – сталь 09Г2С-12-1. Модуль упругости  $E=2,06 \cdot 10^5$  МПа. Напряжения в стержнях ограничивались величиной 345 МПа. Вертикальное перемещение каждого из узлов по абсолютной величине не допускалось больше 4,8 см, что удовлетворяет требованиям свода правил [19] по условию жесткости конструкции. Ограничения по устойчивости стержней учитывались в соответствии с нормами [20].

Для стержней, изображенных сплошными линиями, допускалось выбирать следующие профили парных уголков по ГОСТ 8509-93: 1) 30х3; 2) 50х5; 3) 75х5; 4) 80х6; 5) 90х7; 6) 100х8; 7) 110х8; 8) 125х10; 9) 140х10; 10) 160х10; 11) 180х12; 12) 200х20. Во множество  $\{T\}$  входили площади и моменты инерции этих сечений. Стержень, обозначенный пунктиром, представляет собой конструктивный элемент, служащий для обеспечения неизменяемости конструкции отправочных полуферм. Принимаем его сечение в виде парного уголка 30х3 и в процессе

Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней

оптимизации не учитываем. Варьировались координаты узлов  $c$ ,  $d$  и  $e$  (см. рис. 3) по оси  $y$ . На рисунке 3 горизонтальными штриховыми линиями показаны пределы допустимых значений варьируемых координат. Множество  $\{Y\} = \{-100; -75; -50; -25; 0; 25; 50; 75; 100; 125; 130; 135; 140; 145; 150; 160; 170; 180; 190; 200; 210; 220; 230; 240; 250\}$ , см. Условия симметрии конструкции заранее не устанавливались. В каждом поколении алгоритма рассматривались популяции из 20 особей. Всего варьировалось 19 параметров. Для расчета стоимости устройства узловых соединений задавалось  $b_{min} = 60$  мм.

В результате выполнения итерационного процесса было найдено несколько близких решений с лучшими значениями  $C$  и  $C_M$ . Здесь значения  $C_M$  получены в результате реализации простого генетического алгоритма без учета узловых соединений [8]. Наиболее рациональные из ферм изображены на рисунке 4. Цифрами на этом рисунке показаны номера выбранных профилей в стержнях фермы в соответствии с принятой нумерацией.



**Рисунок 4. Результаты решения задачи:**  
 а, б – рациональные конструкции с лучшими значениями  $C$ ;  
 в, г – фермы с минимальными величинами  $C_M$



Результаты решения задачи представлены в таблице 3. Все решения найдены не более чем за 1000 итераций генетического алгоритма. При этом выполнено  $2 \cdot 10^4$  расчетов. Общее число возможных вариантов расчета конструкции составляет  $K = 12^{16} \cdot 25^3 \approx 2,88 \cdot 10^{21}$ .

**Таблица 3. Рациональные параметры несущих систем и сравнение решений**

Позиция	Координата, см			Стоимость стержней, руб.	Стоимость узловых соединений, руб.	Плановая себестоимость, руб.
	$y_1$	$y_2$	$y_3$			
Рис. 4а	160	170	160	113148	19967	133115
Рис. 4б	160	150	160	115886	17829	133715
Рис. 4в	170	250	170	100739	36452*	137191
Рис. 4г	220	200	220	103977	34473	138450
С.1.460.2-10/88.1	0	0	0	-	-	139200**

\* Вычислено для конструкции, полученной в процессе оптимизации без учета стоимости узловых соединений.

\*\* Получено:  $C \cdot m = 80000 \times 1,740 = 139200$  руб., где  $C$  – средняя плановая себестоимость 1 т фермы из парных уголков;  $m$  – масса (т) фермы марки ФП12-1000.

Как видно из таблицы 3, предлагаемый алгоритм позволяет снизить стоимость изготовления узлов конструкции более чем на 45% (строки 1, 3 и 2, 4 соответственно). Таблица 3 показывает, что плановая себестоимость наиболее рационального варианта конструкции меньше себестоимости фермы серийного производства более чем на 4%. При массовом производстве конструкций такого типа можно получить значительный экономический эффект.

### Выводы

1. Разработана вычислительная схема оптимизации стальных ферм с профилями стержней в виде парных уголков и сварными узловыми соединениями на фасонках. Предлагаемая итерационная процедура базируется на эффективном эволюционном алгоритме параметрического синтеза несущих систем, учитывающем оценку стоимости материалов и работ по изготовлению конструкции.

2. Представленная вычислительная схема реализована в программном комплексе «BGTADEM/OPTIMA», св. №2012619002 от 14.12.2012.

3. Представленный алгоритм после соответствующих модификаций можно применить для оптимального проектирования широкого класса стержневых металлоконструкций различных типов, например, трубчатых ферм, структурных плит, плоских рам и т. п.

*Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ 13-08-00457 «Оптимизация конструктивных систем с учетом возможности аварийных ситуаций».*

### Литература

1. Wu C.Y., Tseng C.Y. Truss structure optimization using adaptive multi-population differential evolution // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 42. Pp. 351–369.
2. Balling R., Briggs R., Gillman K. Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm // Journal of Structural Engineering. ASCE. 2006. Vol. 132. Pp. 1158–1165.
3. Su R., Gui L., Fan Z. Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique // Proceedings of the World Congress on Engineering. July 1–3, London, U.K. 2009. Vol. 2. Pp. 45–56.
4. Кирсанов М.Н. Генетический алгоритм оптимизации стержневых систем // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 2. С. 60–63.
5. Алёхин В.Н., Ханина А.Б. Разработка модели генетического алгоритма для оптимизации стальных многоэтажных рам // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2008. Vol. 4. Issue 2. Pp. 16–18.

6. Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций. Киев: Сталь, 2008. 538 с.
7. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация металлических конструкций путем эволюционного моделирования. М.: АСВ, 2012. 240 с.
8. Алексейцев А.В., Курченко Н.С. Поиск рациональных параметров стержневых металлоконструкций на основе адаптивной эволюционной модели // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. №3. С. 7–15.
9. Юрьев А.Г., Ключев С.В. Эволюционные и генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2006. 134 с.
10. Алексейцев А.В., Серпик И.Н. Оптимизация плоских ферм на основе генетического поиска и итеративной процедуры триангуляции // Строительство и реконструкция. 2011. №2(34). С. 3–8.
11. Ольков Я.И., Андроников А.В. Автоматизированное оптимальное проектирование пространственных металлических стержневых конструкций с использованием алгоритмов структурной оптимизации // Известия вузов. Строительство. 2003. №12. С. 8–13.
12. Серпик И.Н., Шевченко К.В. Разработка генетического алгоритма слабозаимодействующих популяций для оптимизации несущих систем // Вестник Брянского государственного технического университета. 2010. №10. С. 67–73.
13. Серпик И.Н., Лелетко А.А., Алексейцев А.В. Эволюционный синтез металлических плоских рам в случае оценки несущей способности по методу предельного равновесия // Известия вузов. Строительство. 2007. №8. С. 4–9.
14. Canyurt O.E., Hajela P. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 40. No.1–6. Pp. 201–214.
15. Khajavirad A., Michalek J.J., Simpson T.W. An efficient decomposed multiobjective genetic algorithm for solving the joint product platform selection and product family design problem with generalized commonality // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2009. Vol. 39. No.2. Pp. 187–201.
16. Pappa G.L., Freitas A.A. Automating the design of data mining algorithms. An evolutionary computation approach. Berlin, Heidelberg: Springer–Verlag, 2010. 197 p.
17. Banichuk N., Serra M., Sinitsyn A. Shape optimization of quasi-brittle axisymmetric shells by genetic algorithm // Computers & Structures. 2006. Vol. 84. No.29–30. Pp. 1925–1933.
18. Бате К. Методы конечных элементов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. 1024 с.
19. СП 20.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*. Нагрузки и воздействия. М.: ГУП ЦПП, 2011. 36 с.
20. СП 16.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II–23–81\*. Стальные конструкции. М.: ГУП ЦПП, 2011. 96 с.

*\*Анатолий Викторович Алексейцев, г. Брянск, Россия  
Тел. раб.: +7(4832)646931; эл. почта: aalexw@mail.ru*

© Алексейцев А.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.40.3

## Evolutionary optimization of steel trusses with the nodal joints of rods

**A.V. Alekseytsev,***Bryansk State Academy of Engineering and Technology, Bryansk, Russia  
+7(960)564-33-58; e-mail: aalexw@mail.ru*

### Key words

evolutionary modeling; elitism; parametric optimization; trusses; genetic operators; weakly interacting populations; finite element analysis; the angle sections; the joints of rods

### Abstract

This article describes the process of constructing a genetic parametrical-optimization algorithm of trusses with the possibility of account the cost of manufacturing the nodal joints of rods. Accounting nodal joints in the process of parametric design synthesis will allow finding bearing systems with rational cost of their production.

Parametric optimization was performed on the basis of modified genetic algorithm with constraints on the strength, stiffness and stability of the bearing system. The multipoint crossover and mutation operators and weakly interacting populations were used. The objective function takes into account the specific manufacturing of nodal joints for trusses with profiles of sections as binary angles. The cost of nodes is calculated on the basis of labor costs and materials used in the design of welded joints. A computational scheme for optimizing steel trusses of rods with profiles as paired angle sections and welded nodal joints is developed. The proposed iterative procedure is based on an efficient evolutionary algorithm for parametric synthesis of bearing systems that takes into account the valuation of materials and labor cost for the production of the structure.

The example of optimal designing a secondary truss in frame building is considered. The solutions obtained as a result of optimization, considering the cost of nodes and not considering it, are compared. The above example confirms the efficiency of the proposed computational procedures.

### References

1. Wu C.Y., Tseng C.Y. Truss structure optimization using adaptive multi-population differential evolution. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2010. Vol. 42. Pp. 351–369.
2. Balling R., Briggs R., Gillman K. Multiple optimum size/shape/topology designs for skeletal structures using a genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*. ASCE. 2006. Vol. 132. Pp. 1158–1165.
3. Su R., Gui L., Fan Z. Truss topology optimization using genetic algorithm with individual identification technique. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. July 1 – 3, London, U.K. 2009. Vol. 2. Pp. 45–56.
4. Kirsanov M.N. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2010. No.2. Pp. 60–63. (rus)
5. Alyokhin V.N., Khanina A.B. Razrabotka modeli geneticheskogo algoritma dlya optimizatsii stalnykh mnogoetazhnykh ram. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2008. Vol. 80. Pp. 16–18. (rus)
6. Permyakov V.A., Perelmuter A.V., Yurchenko V.V. *Optimalnoye proyektirovaniye stalnykh ster-zhnevnykh konstruktsiy* [Optimal design of steel framing]. Kiev: Stal, 2008. 538 p.
7. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. *Optimizatsiya metallicheskih konstruktsiy putem evolyutsionnogo modelirovaniya* [Optimization of metal structure by evolutionary modeling]. Moscow: Izdatelstvo ASV, 2012. 240 p.
8. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2011. No.3. Pp. 7–15. (rus)
9. Yuryev A.G., Klyuyev S.V. *Evolutsionnyye i geneticheskiye algoritmy optimizatsii stroitelnykh konstruktsiy* [Evolutionary and genetic algorithm of optimization of building structures]. Belgorod: Izd-vo BGTU im. V.G. Shukhova, 2006. 134 p.
10. Alekseytsev A.V., Serpik I.N. *Building and reconstruction*. 2011. No.2(34). Pp. 3–8. (rus)

11. Olkov Ya.I., Andronikov A.V. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2003. No.12. Pp. 8–13. (rus)
12. Serpik I.N., Shevchenko K.V. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. No.10. Pp. 67–73. (rus)
13. Serpik I.N., Leletko A.A., Alekseytsev A.V. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007. No.8. Pp. 4–9. (rus)
14. Canyurt O.E., Hajela P. Cellular genetic algorithm technique for the multicriterion design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2010. Vol. 40. No.1–6. Pp. 201–214.
15. Khajavirad A., Michalek J.J., Simpson T.W. An efficient decomposed multiobjective genetic algorithm for solving the joint product platform selection and product family design problem with generalized commonality. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009. Vol. 39. No.2. Pp. 187–201.
16. Pappa G.L., Freitas A.A. *Automating the design of data mining algorithms. An evolutionary computation approach*. Berlin, Heidelberg: Springer–Verlag, 2010. 197 p.
17. Banichuk N., Serra M., Sinitsyn A. Shape optimization of quasi-brittle axisymmetric shells by genetic algorithm. *Computers & Structures*. 2006. Vol. 84. No. 29–30. Pp. 1925–1933.
18. Bate K. *Metody konechnykh elementov* [Finite element methods]. Moscow: FIZMATLIT. 2010. 1024 p. (rus)
19. *SP 20.13330.2011. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07–85\*. Nagruzki i vozdeystviya* [Set of rules 20.13330.2011. Actualized edition of building code 2.01.07–85\*. Load and action]. Moscow: GUP TsPP, 2011. 36 p. (rus)
20. *SP 16.13330.2011. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II–23–81\*. Stalnyye konstruksii* [Set of rules 16.13330.2011. Actualized edition of building code II–23–81\*. Steel structures]. Moscow: GUP TsPP, 2011. 96 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 28–37**