

*Денисюк О.Р., Борзов С.А.*

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина

В работе предлагается новый эффективный алгоритм решения задач оптимального проектирования корродирующих шарнирно-стержневых конструкций, предполагающий получение решения с заданной точностью. При решении оптимизационной задачи требуется определить параметры сечений элементов таким образом, чтобы объём конструкции был минимальным, и в течение заданного срока эксплуатации она сохраняла несущую способность, то есть удовлетворяла ограничениям по прочности и устойчивости. Вычисление функций ограничений предполагает численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозии в элементах конструкции. Влияние механических напряжений на скорость коррозии предполагает решение задачи напряжённо-деформированного состояния в каждом узле временной сетки, что приводит к повышенным требованиям к эффективности вычислительного алгоритма. Шарнирно-стержневые конструкции изготавливаются из прокатных профилей, размеры сечений которых регламентированы стандартами. В связи с этим поиск решения осуществлялся на дискретном неметрическом множестве варьируемых параметров. Оптимизационный алгоритм построен на использовании стратегии скользящего допуска совместно с вещественным целочисленным генетическим алгоритмом. Использование метода скользящего допуска позволяет менять точность решения на разных этапах решения оптимизационной задачи с использованием генетического алгоритма. Для обеспечения требуемой точности вычисления функций ограничений в окрестности экстремума используется искусственная нейронная сеть, аппроксимирующая зависимость между параметрами конструкции, допустимой погрешностью решения (критерием скользящего допуска) и параметрами вычислительных процедур. Анализ эффективности разработанного алгоритма, использующий в качестве критерия эффективности количество обращений к процедуре метода конечных элементов в процессе поиска оптимального решения, продемонстрировал существенное снижение вычислительных затрат по сравнению с известными алгоритмами.

**Ключевые слова:** оптимальное проектирование, дискретная оптимизация, генетический алгоритм, метод скользящего допуска, нейронная сеть, коррозия.

### *Постановка проблемы*

В процессе эксплуатации конструкции, используемые, в частности, в химической промышленности, подвергаются воздействию технологических рабочих сред, агрессивных по отношению к металлу. Это вызывает разрушение приповерхностного слоя металла (коррозионный износ) и приводит к уменьшению геометрических размеров сечений конструктивных элементов, снижению несущей способности конструкций и преждевременному выходу их из строя. Можно выделить три вида потерь от коррозии:

прямые потери – стоимость разрушенного вследствие коррозии металла, косвенные, связанные с экономическим ущербом в результате преждевременного выхода конструкций из строя, и потери, вызванные нерациональными конструкторскими решениями. Потери третьего вида обусловлены, по мнению авторов, отсутствием надёжных, точных и эффективных методик оптимального проектирования конструкций с учётом происходящих коррозионных процессов.

При решении задач оптимального проектирования конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред, важнейшим критери-

ем выбора численного алгоритма является его эффективность (возможность получения решения с минимальными вычислительными затратами). Значимость этого критерия связана с затратами при вычислении функций ограничений (ФО).

Вычисление ФО предполагает численное решение системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих процесс коррозии в элементах конструкции. Существенное влияние механических напряжений на скорость коррозии предполагает решение задачи напряжённо-деформированного состояния, например, методом конечных элементов в каждом узле временной сетки [1]. Наличие обратной связи в математических моделях расчета и существенное возрастание количества параметров, определяющих в произвольный момент времени геометрические размеры конструкции, обуславливают значительное увеличение вычислительных затрат при решении задач такого типа по сравнению с «классическими» задачами оптимизации. Это делает проблему эффективности численных алгоритмов особенно актуальной для задач данного класса.

В процессе поиска оптимального решения варьируемые параметры изменяются на каждой итерации, и при неизменном параметре численного решения СДУ контролировать погрешность вычисления ФО невозможно. Таким образом, второй актуальной проблемой является погрешность получаемого решения.

В качестве объекта исследования в данной работе рассматриваются шарнирно-стержневые конструкции (ШСК), функционирующие в высокоагрессивных технологических средах. Для таких сред характерны высокая скорость процесса коррозии (более 0,05 см/год), а также существенное влияние механических напряжений на скорость процесса. Некоторые наиболее распространённые модели, описывающие этот процесс, приведены в [1]. Там же приведено обоснование модели, принятой для дальнейшего исследования:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 (1 + k\sigma), \quad (1)$$

здесь  $\delta$  – глубина коррозионного поражения (параметр повреждённости);  $t$  – время;  $v_0$  – скорость коррозии при отсутствии напряжений;  $k$  – коэффициент влияния напряжения;  $\sigma$  – абсолютное значение напряжения.

Постановка задачи оптимального проектирования корродирующих ШСК может быть

сформулирована следующим образом. Требуется определить параметры сечений элементов таким образом, чтобы объём конструкции был минимальным, и в течение заданного срока эксплуатации она сохраняла несущую способность, то есть удовлетворяла ограничениям по прочности и устойчивости.

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N L_i A_i(\bar{x}) \rightarrow \min; \quad \bar{x} \in X_D; \quad (2)$$

$$X_D : \{ \bar{x} \in E^n \mid g(\bar{x}) = \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0; i \in \overline{1, N} \}, \quad (3)$$

здесь  $L_i, A_i$  – длина и площадь сечения  $i$ -го элемента;  $N$  – количество элементов конструкции;  $\bar{x}$  – вектор варьируемых параметров;  $\sigma_i$  и  $\sigma_i^*$  – текущее и предельное напряжения в  $i$ -м элементе;  $t^*$  – заданное время эксплуатации конструкции.

Ранее в качестве варьируемых параметров рассматривались размеры сечений стержней, при этом форма сечения полагалась известной. Так, в [2–3] рассматривались стержни круглого и кольцевого сечений. Варьируемые параметры изменялись непрерывно в заданных границах.

В настоящей работе предлагается рассматривать ШСК, элементы которых изготовлены из стандартных прокатных профилей: двутавра, швеллера, уголка. В этом случае размеры сечения, во-первых, могут изменяться только дискретно, во-вторых, не могут изменяться независимо. Поэтому вектор варьируемых параметров будет представлять собой совокупность индексов, определяющих тип и типоразмер сечения. Пространство поиска решения оптимизационной задачи, таким образом, является дискретным и неметрическим.

При моделировании поведения конструкции в агрессивной среде принимаются следующие допущения:

- в местах соединений стержней процесс коррозии протекает так же, как и во всей конструкции в целом;

- в конструкции отсутствуют монтажные напряжения; величина напряжений в элементах определяется только внешними нагрузками и собственным весом стержней.

#### *Анализ последних исследований и публикаций*

Обзор исследований по проблеме использования методов нелинейного математического программирования при решении задач оптимального проектирования конструкций, подвер-

женных воздействию агрессивных сред, достаточно полно представлен в [4]. За годы, прошедшие после выхода обзора, получили развитие различные алгоритмы метода скользящего допуска (МСД), позволяющие уменьшить вычислительные затраты за счёт изменения точности вычисления ФО на различных этапах решения задачи оптимизации [5]. Однако существующие алгоритмы этого метода не гарантируют получения результата с требуемой точностью. Для этого необходим алгоритм управления погрешностью численного решения СДУ, моделирующих процесс накопления геометрических повреждений в элементах конструкций.

В работе [2], очевидно, впервые, было предложено использовать искусственные нейронные сети (ИНС) для определения параметров численного решения СДУ, обеспечивающих для текущего вектора варьируемых параметров заданную точность решения. В дальнейшем эта идея была использована при создании алгоритма управления точностью численного решения СДУ.

Работы [2–3] были посвящены решению задач оптимизации корродирующих шарнирностержневых конструкций (ШСК) на непрерывном множестве варьируемых параметров, что существенно снижало их практическое применение. Как правило, ШСК изготавливаются из прокатных профилей, размеры сечений которых регламентированы стандартами. Значительно больший интерес, по мнению авторов, представляют постановки задач, предполагающие дискретное изменение размеров сечений стержневых элементов. Варьируемыми параметрами в такой постановке могут быть тип и типоразмер профиля. Таким образом, имеет место задача дискретной оптимизации комбинаторного типа, решение которой ищется на неметрическом множестве (множестве индексов).

В последние годы для решения задач дискретной оптимизации с успехом используются генетические алгоритмы (ГА) [6–9]. При реализации ГА используется информация только о целевой функции и функциях ограничений, следовательно, их эффективность объективно ниже, чем у методов математического программирования, использующих производные этих функций. Один из способов повышения эффективности ГА заключается в минимизации вычислительных затрат при вычислении ФО.

#### **Формулирование цели исследования**

Целью настоящей работы является создание эффективного алгоритма решения задачи

оптимального проектирования корродирующих конструкций на основе генетических алгоритмов совместно с методом скользящего допуска и нейросетевым алгоритмом управления точностью вычисления функций ограничений.

#### **Изложение основного материала исследования**

Как отмечалось выше, наиболее важными при построении оптимизационных алгоритмов являются взаимно противоречивые критерии – точность и эффективность. В данном случае точность решения подразумевает не только нахождение глобального минимума функции (2), но, в первую очередь, точность вычисления функций ограничений. Как отмечено в [10], вопрос о том, как именно разрушится конструкция вследствие коррозионного износа, имеет чисто теоретическое значение. Главным критерием является её долговечность, для вычисления которой используется модель коррозионного деформирования конструкции.

Поведение конструкции в агрессивной среде моделируется путём численного решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \left[ 1 + \sigma_i(\bar{\delta}) \right]; \delta_i|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где  $\delta_i$  и  $\sigma_i$  – глубина коррозионного поражения и напряжение в  $i$ -м элементе.

Вычисление функций напряжений предполагает решение системы уравнений механики, состоящей из системы уравнений равновесия и совместности деформаций, соотношений Коши и закона Гука. В терминах метода конечных элементов эта система имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= K \cdot \bar{u}; \\ \bar{\epsilon} &= D \cdot \bar{u}; \\ \bar{\sigma} &= E \cdot \bar{\epsilon}, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь  $K, D, E$  – матрицы жёсткости, дифференцирования и упругости;  $\bar{R}, \bar{u}, \bar{\epsilon}, \bar{\sigma}$  – векторы внешних нагрузок, узловых перемещений, деформаций и напряжений. При этом коэффициенты матрицы жёсткости зависят от площадей сечений, а, следовательно, изменяются во времени.

Таким образом, в общем случае решение системы (4) возможно только численно. Очевидно, что вычислительные затраты на решение такой задачи многократно превышают те,

которые необходимы для решения задачи оптимального проектирования в традиционной постановке.

Параметры численного решения СДУ как правило остаются постоянными в процессе решения задачи. В то же время геометрические характеристики сечений стержней изменяются в пределах, заданных границами изменения варьируемых параметров. Погрешность получаемого результата в этом случае не поддается прогнозу. Назначение таких параметров численного решения, которые с приемлемой вероятностью позволят определить долговечность конструкции с допустимой погрешностью на всём пространстве решений, приведёт к чрезмерным вычислительным затратам. Для успешного решения данной проблемы необходимо определять параметры численного решения СДУ на основании информации о параметрах конструкции (варьируемых и постоянных), параметрах АС и величины допустимой погрешности. Другими словами, необходимо построить аппроксимирующую функцию, формализующую эту зависимость. Для этого следует выбрать алгоритм решения СДУ и параметр управления погрешностью её решения, определить значимые параметры и способ аппроксимации.

Аппроксимировать зависимость между параметром численного алгоритма решения СДУ, параметрами стержневого элемента, АС и допустимой погрешностью решения предлагается с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). На рис. 1 показана архитектура нейронной сети для растянутых и сжатых стержней. Они отличаются входными параметрами.

Для растянутого стержня значимыми параметрами являются площадь и периметр сечения, начальное напряжение и скорость коррозии. Так как форма сечения при этом значения не имеет, в качестве эквивалентного сечения предлагается использовать кольцо. Входные параметры нейронной сети при этом – внешний

радиус  $R$ , отношение внутреннего радиуса к внешнему  $g$ , начальное напряжение  $\sigma_0$ , скорость коррозии при отсутствии напряжений  $v_0$  и допустимая погрешность решения  $\varepsilon^*$ .

Для сжатого стержня форма сечения является важнейшим параметром, так как она определяет правила вычисления момента инерции сечения. Для каждого типа сечения (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголки) обучается своя сеть. Все размеры фасонных профилей регламентируются стандартами, поэтому в качестве входного параметра вместо радиусов, которые применялись в случае растянутого стержня, используется номер типоразмера соответствующего профиля  $n$ . Длина стержня оказывает существенное влияние на значение критического напряжения потери устойчивости. Она может быть пересчитана по величине начального критического напряжения потери устойчивости  $\sigma_0^*$ , которое является дополнительным входным параметром для данной ИНС.

Подробное описание нейросетевого алгоритма управления погрешностью изложено в [11].

Для решения поставленной задачи предложен и обоснован алгоритм, позволяющий, по мнению авторов, существенно снизить вычислительные затраты при одновременном выполнении условия точности получаемого оптимального решения.

Для сведения исходной задачи (2)–(3) к задаче на безусловный экстремум используется метод внешних штрафных функций. Исходная задача преобразуется к следующему виду:

$$P(\bar{x}) = F(\bar{x}) + \sum_{i=1}^N H_i [\sigma_i^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_i(\bar{x}, t^*)];$$

$$H_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) \geq \sigma_i(\bar{x}, t^*) \\ H^*, & \text{если } \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) < \sigma_i(\bar{x}, t^*), \end{cases} \quad (6)$$

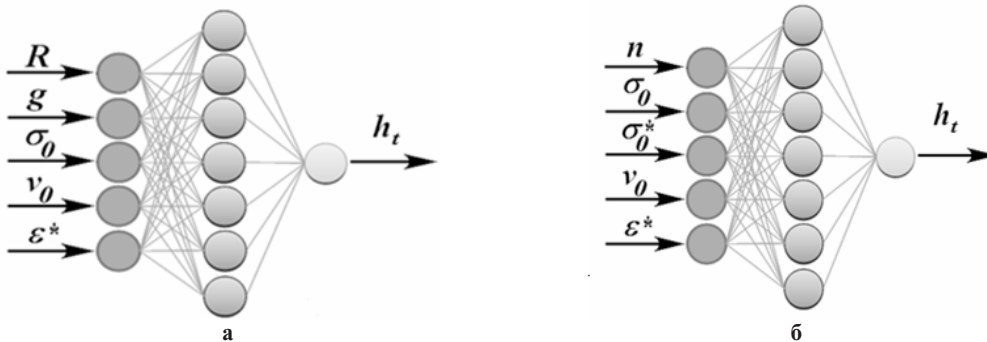


Рис. 1. Архитектура нейронной сети для растянутого (а) и сжатого (б) стержней



где  $H^*$  – штрафной коэффициент.

Для решения задачи безусловной оптимизации предлагается использовать целочисленный генетический алгоритм. Основные положения построения ГА достаточно полно изложены, например, в [12], поэтому ниже приводятся лишь способы формирования пространства решений и кодирования хромосомы, используемые в данной работе.

В большинстве известных работ, посвященных дискретной оптимизации шарнирно-стержневых конструкций, в качестве варьируемых параметров рассматривались площади сечений конструктивных элементов [6–9]. В данных работах, однако, не рассматривались конструкции, эксплуатирующиеся в условиях агрессивных сред, и, соответственно, не принималось во внимание изменение геометрических характеристик стержней в результате коррозионного износа. Поскольку площади сечений элементов конструкции будут меняться по мере накопления геометрических повреждений, это не позволяет использовать их в качестве варьируемых параметров в данной задаче. Авторами предлагается новый способ кодирования пространства решений оптимизационной задачи в виде трёхмерного массива, строки которого содержат размеры сечений и определяются варьируемыми параметрами (индексами).

Хромосома (аналог вектора варьируемых параметров) представляет собой множество индексов, определяющих положение размеров сечений в трехмерном массиве, где номер слоя (тип сечения) определяется нечётными индексами, номер строки (типоразмер сечения) – чётными. Таким образом, количество генов (аналог варьируемого параметра) в хромосоме равно  $2N$ , где  $N$  – количество стержневых элементов, оптимальные параметры которых требуется определить. На рис. 2 и 3 показано пространство решений оптимизационной задачи и способ кодирования хромосомы.

Рассматриваемые в работе сечения описываются разным количеством размерами (от 4 для равнополочного уголка до 7 для двутавра). В этом случае построение модели корродирующего сечения реального профиля связано со значительными неудобствами, поэтому в работе используются модели сечений, состоящих из прямоугольных фрагментов. Такие сечения определяются четырьмя размерами, независимо от его типа. Размеры определяются таким образом, чтобы изменение геометрических характеристик (площади и минимального момента инерции) в

них происходило так же, как и в реальных сечениях. Методика определения размеров таких модельных сечений приведена в [13].

Процедура декодирования данных, содержащихся в хромосоме, заключается в извлечении из массива размеров сечений значений, расположенных в том слое и строке, номера которых соответствуют парам генов.

Описание моделей эволюции и популяции, используемых при решении задачи, а также реализованных генетических операторов будут приведены ниже в численной иллюстрации.

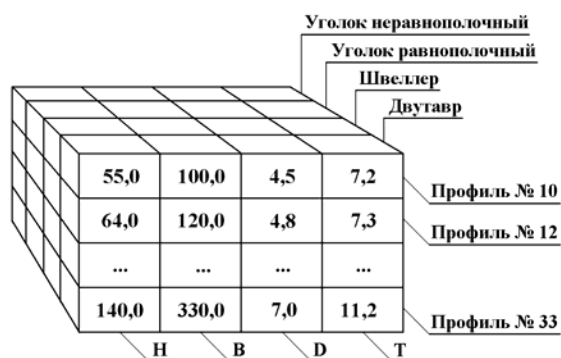


Рис. 2. Пространство решений задачи

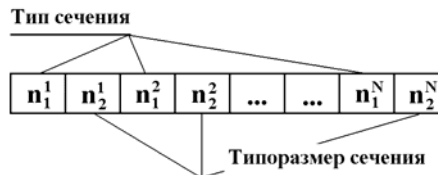


Рис. 3. Пример кодирования хромосомы

Возможность управления погрешностью вычисления функций ограничений позволит существенно повысить эффективность оптимизационного алгоритма. Для этого в работе предлагается использовать совместно с генетическим алгоритмом метод скользящего допуска [14].

При использовании метода скользящего допуска (МСД) система ограничений (3) может быть представлена в виде:

$$X_D : \{ \bar{x} \in E^n \mid g_1(\bar{x}) = Y(k) - T(\bar{x}, t^*) \geq 0 \} , \quad (7)$$

где  $Y$  – критерий скользящего допуска (КСД) – убывающая функция номера итерации  $k$  при решении задачи оптимизации;  $T$  – функционал над всем множеством функций ограничений.

В качестве  $Y$  предлагается принять допус-

тимую погрешность вычисления ФО, в качестве Т – относительную погрешность вычисления ФО. Решение задачи ищется как на границе допустимой области пространства решений, так и за её пределами на расстоянии, определяемом критерием скользящего допуска.

В этом случае на начальных итерациях поиска решения погрешность вычисления ФО может быть достаточно высокой, что позволяет минимизировать вычислительные затраты, в окрестности же экстремума погрешность не превышает некоторой допустимой величины, определяемой заказчиком. Общая схема алгоритма решения задачи оптимизации приведена на рис. 4.

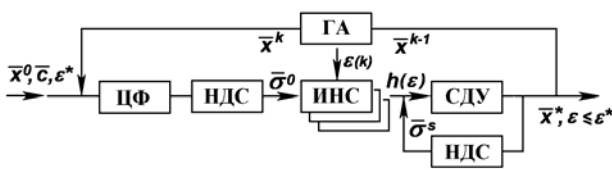


Рис. 4. Схема алгоритма решения задачи оптимизации

В процессе решения задачи, согласно идее МСД, значение критерия скользящего допуска (допустимой погрешности вычисления функции ограничений) должно уменьшаться по мере приближения к экстремуму. Предлагается уменьшать КСД в зависимости от номера эпохи при работе ГА:

$$Y(k) = \epsilon_k = \epsilon_{\max} - \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{n} \cdot \text{int} \left( \frac{k \cdot n}{k_{\max}} \right), \quad (8)$$

здесь  $k_{\max}$  – максимальное количество эпох;  $n$  – количество шагов изменения КСД;  $\epsilon_{\min}$ ,  $\epsilon_{\max}$  – допустимые значения погрешностей на начальном этапе решения задачи и в окрестности экстремума.

Штрафные слагаемые в функции (4) будут определяться по формуле

$$H = H^* \cdot \left( Y(k) - \frac{|t^* - t[\bar{x}, h_t(\bar{x}, Y(k))]|}{t^*} \right), \quad (9)$$

где  $h_t$  – шаг численного решения СДУ (5), зависящий от значений варьируемых параметров и допустимой погрешности на  $k$ -й эпохи при реализации генетического алгоритма.

Для иллюстрации предложенного алгоритма рассмотрим решение задачи оптимального проектирования статически неопределимой пятистержневой фермы (рис. 5).

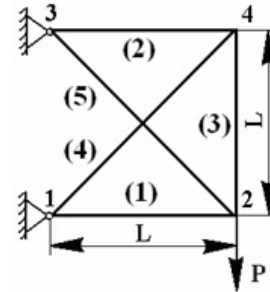


Рис. 5. Расчётная схема модельной конструкции

При тестировании оптимизационного алгоритма использовалась начальная популяция из 250 особей. Объектом исследований служила пятистержневая ШСК, показанная на рис. 4. Конструкция должна была сохранять свою несущую способность не менее, чем 2,5 года.

Задача оптимизации решалась на протяжении 100 эпох или до достижения полного схождения популяции. При этом, согласно алгоритму метода скользящего допуска, погрешность вычисления функции ограничений снижалась после каждых 20 эпох или при достижении схождения популяции, что позволило снизить вычислительные затраты на ранних этапах оптимизации и получить погрешность численного решения, не превышающую заданной заказчиком допустимой величины, вблизи экстремума. В данном случае, максимальная погрешность вычисления функции ограничений на начальных итерациях поиска составила 5%, минимальная погрешность на последних итерациях – 1%.

В используемом для решения задачи генетическом алгоритме была реализована модель эволюции де Фриза, которая характеризуется высокой вероятностью мутаций. При этом возможность мутации была предусмотрена только для чётных генов, определяющих размер сечения. В алгоритме были использованы одноточечный оператор кроссовера и оператор турнирного отбора.

Оптимальные сечения элементов ШСК, полученные в результате решения задачи, представлены в табл. 1.

Объем полученной конструкции составил 34604,42 см<sup>3</sup>.

Таблица 1  
Оптимальные сечения стержней пятиэлементной фермы

№	Тип сечения	Типоразмер	t, лет
1	Уголок	125×125×9	2,52948
2	Уголок	125×80×8	2,56995
3	Уголок	125×80×8	2,57016
4	Уголок	140×140×10	2,69019
5	Уголок	125×125×9	2,55430

В качестве критерия эффективности разработанного алгоритма принималось количество обращений к процедуре метода конечных элементов в процессе поиска оптимального решения. В табл. 2 показаны результаты тестирования эффективности алгоритма. В строках табл. 2 приведены данные о количестве решений задачи МКЭ:

– при использовании для вычисления функции ограничений фиксированного шага, обеспечивающего погрешность, не превышающую  $\epsilon_{\min}$  на всём множестве варьируемых параметров;

– при использовании нейросетевого модуля для определения расстояния между узлами временной сетки на основании информации о текущих параметрах конструкции, параметрах агрессивной среды и допустимой погрешности  $\epsilon_{\min}$ ;

– при использовании нейросетевого модуля в сочетании с методом скользящего допуска.

Таблица 2  
Анализ эффективности алгоритма

Алгоритм	Количество обращений к МКЭ
ГА	3 375 508
НС+ГА	1 618 484
МСД+НС+ГА	528 043

### Выводы

Предложено и обосновано использование генетических алгоритмов при решении задач дискретной оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых конструкций. Разработанный авторами нейросетевой алгоритм управления погрешностью вычисления функций ограничений позволил использовать концепцию метода скользящего допуска и существенно снизить вычислительные затраты на поиск оптимальных решений. С помощью оптимизационного алгоритма получены решения новых задач оптимизации, представляющие научный и практический интерес.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А., Науменко Н.Ю. Информационное обеспечение расчетов корродирующих объектов. Математические модели и концепция проектирования систем. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012 – 264 с.

2. Зеленцов Д.Г., Короткая Л.И. Нейронные сети как средство модификации метода скользящего допуска // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/4 (52). – С.21-24.

3. Зеленцов Д.Г., Новикова Л.В., Науменко Н.Ю. Алгоритм управления точностью численного решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений // Системні технології. – 2012. – Вип. 5 (82). – С.71-79.

4. Зеленцов Д.Г., Филатов Г.В. Обзор исследований по применению методов нелинейного математического программирования к оптимальному проектированию конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Вопросы химии и химической технологии. – 2002. – № 4. – С.108-115.

5. Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю. Адаптация метода скользящего допуска к задачам оптимизации корродирующих конструкций // Системні технології. – 2005. – Вип. 2 (37). – С.48-56.

6. Cazacu R., Grama L. Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA // Procedia Technology. – 2012. – Vol. 12. – P.339-346.

7. Azad S.K., Kulnarni A.J. Structural optimization using a mutation-based genetic algorithm // Iran University of Science & Technology. – 2012. – Vol. 2. – № 1. – P.81-101.

8. Webb D., Alobaidi W., Sandgerm E. Structural Design via Genetic Optimization // Modern Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 7. – No. 3. – P.73-90.

9. Assimi H., Jamali A. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming // Swarm and Evolutionary Computation. – 2017. – Vol. 37. – P.90-103.

10. Овчинников И.Г. О задачах оптимального проектирования конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 9. – С.17-22.

11. Зеленцов Д.Г., Денисюк О.Р. Алгоритм решения задач оптимизации корродирующих конструкций на основе метода скользящего допуска // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 2 (28). – С.51-57.

12. Ashlock D. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization. – New York: Springer. – 2006. – 572 p.

13. Зеленцов Д.Г., Новикова Л.В., Денисюк О.Р. Математические модели сечений элементов шарнирно-стержневых конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – № 2 (53). – С.146-151.

14. Himmelblau D.M. Applied nonlinear programming. – McGraw-Hill. – 1972. – 498 p.

Поступила в редакцию 15.10.2017

**ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ В ЗАДАЧАХ ДИСКРЕТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОРОДУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ****Денисюк О.Р., Борзов С.О.**

У роботі запропоновано новий ефективний алгоритм розв'язання задач оптимального проектування кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій, що передбачає отримання розв'язку із заданою точністю. При вирішенні оптимізаційної задачі потрібно визначити параметри перерізів елементів таким чином, щоб обсяг конструкції був мінімальним, і протягом заданого терміну експлуатації вона зберігала несучу здатність, тобто задовольняла обмеженням по міцності і стійкості. Обчислення функцій обмежень передбачає чисельне розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують процес корозії в елементах конструкції. Вплив механічної напруги на швидкість корозії передбачає вирішення задачі напружено-деформованого стану в кожному вузлі часової сітки, що призводить до підвищених вимог до ефективності обчислювального алгоритму. Шарнірно-стрижневі конструкції виготовляються з прокатних профілів, розміри перетинів яких регламентовані стандартами. У зв'язку з цим пошук рішення здійснювався на дискретній неметричній множині варіюваних параметрів. Оптимізаційний алгоритм побудований на основі стратегії ковзного допуску спільно з дійсним цілочисельним генетичним алгоритмом. Використання методу ковзного допуску дозволяє змінювати точність розв'язку на різних етапах розв'язання оптимізаційної задачі з використанням генетичного алгоритму. Для забезпечення необхідної точності обчислення функцій обмежень в околі екстремуму використовується штучна нейронна мережа, що апроксимує залежність між параметрами конструкції, допустимою похибкою рішення (критерієм ковзного допуску) і параметрами обчислювальних процедур. Аналіз ефективності розробленого алгоритму, який використовує в якості критерію ефективності кількість звернень до процедури методу скінченних елементів в процесі пошуку оптимального рішення, продемонстрував істотне зниження обчислювальних витрат у порівнянні з відомими алгоритмами.

**Ключові слова:** оптимальне проектування, дискретна оптимізація, генетичний алгоритм, метод ковзного допуску, нейронна мережа, корозія.

**UTILIZATION OF GENETIC ALGORITHMS IN PROBLEMS OF DISCRETE OPTIMIZATION OF CORRODING STRUCTURES****Denysiuk O.R., Borzov S.A.**

The paper proposes a new efficient algorithm to solve the problems of corroding hinged-rod structures optimal design, which involves obtaining solutions with given accuracy. When solving the optimization problem, it is required to determine the parameters of cross-sections of elements in such way that the volume of the structure is minimal, and for a given period of operation it retains its carrying capacity, that is, it satisfies the constraints on strength and stability. Calculation of the constraint functions involves a numerical solution of the system of differential equations describing the process of corrosion in structural elements. The effect of mechanical stresses on the rate of corrosion involves solving the problem of the stress-strain state at each node of the time grid, which leads to increased requirements for the efficiency of the computational algorithm. Hinged-rod structures are made of rolling profiles; the dimensions of sections of these profiles are regulated by standards. Therefore the search for solution is made in a discrete non-metric space of varied parameters. The optimization algorithm is based on use of flexible tolerance strategy together with integer-valued real genetic algorithm. Use of the flexible tolerance method allows to change the accuracy of a

solution at different stages when solving the optimization problem using the genetic algorithm. To ensure the required accuracy of the restrictions function computation in the vicinity of an extremum an artificial neural network approximating the relationship between structure parameters, permissible error of solution (flexible tolerance criterion) and parameters of computational procedures is used. The analysis of effectiveness of the developed algorithm, which used the number of calls to the procedure of the finite element method in the process of searching for the optimal solution as the efficiency criterion, demonstrated a significant decrease in computational costs in comparison with the known algorithms.

**Keywords:** optimal design, discrete optimization, genetic algorithm, flexible tolerance method, neural network, corrosion.

**REFERENCES**

1. Zelentsov D.G., Liashenko O.A., Naumenko N.Yu. *Informatsionnoe obespechenie raschetov korrodiruyuschih ob'ektov. Matematicheskie modeli i kontsepsiya proektirovaniya sistem* [Information support for calculation of corroding objects. Mathematical models and the concept of systems design]. Dnepropetrovsk: Ukrainian State University of Chemical Technology Publ., 2012, 264 p. (in Russian).
2. Zelentsov D.G., Korotkaya L.I. Neyronnyie seti kak sredstvo modifikatsii metoda skolzyashchego dopuska [Neural networks as a means of modifying the flexible tolerance method of sliding tolerance]. *Eastern-European Journal of Journal of Enterprise Technologies*, 2011, vol. 4/4 (52), pp. 21-24. (in Russian).
3. Zelentsov D.G., Novikova L.V., Naumenko N.Yu. Algoritm upravleniya tochnostyu chislenogo resheniya nekotorykh klassov sistem differentsialnykh uravneniy [An algorithm of numerical solution accuracy control for certain classes of systems of differential equations]. *System technologies*, 2012, vol. 5 (82), pp. 71-79. (in Russian).
4. Zelentsov D.G., Filatov G.V. Obzor issledovaniy po primeneniyu metodov nelineynogo matematicheskogo programmirovaniya k optimalnomu proektirovaniyu konstruksiy, vzaimodeystvuyushchih s agressivnoy sredoy [A review of research on the application of methods of nonlinear mathematical programming to the optimal design of structures interacting with an aggressive medium]. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 2002, vol. 4, P.108-115. (in Russian).
5. Zelentsov D.G., Naumenko N.Yu. Adaptatsiya metoda skolzyashchego dopuska k zadacham optimizatsii korrodiruyuschih konstruksiy [Adaptation of the flexible tolerance method to the problems of corroding structures optimization]. *System technologies*, 2005, vol. 2(37), pp. 48-56. (in Russian).
6. Cazacu R., Grama L. Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA. *Procedia Technology*, 2012, vol. 12, pp. 339-346.
7. Azad S. K., Kulnarni A. J. Structural optimization using a mutation-based genetic algorithm. *Iran University of Science & Technology*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 81-101.
8. Webb D., Alobaidi W., Sandgern E. Structural Design via Genetic Optimization. *Modern Mechanical Engineering*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 73-90.
9. Assimi H., Jamali A. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming. *Swarm and Evolu-*



*tionary Computation*, 2017, vol. 37, pp. 90-103.

10. Ovchinnikov I.G. O zadachakh optimalnogo proektirovaniya konstruktsiy, podvergayuschihsvya vozdeystviyu agresivnyh sred [On the problems of optimal design of structures exposed to aggressive media]. *Stroitelstvo i arkhitektura*, Izv. VUZov., 1988, vol. 9, pp. 17-22.

11. Zelentsov D.G., Denysiuk O.R. Algoritm resheniya zadach optimizatsii korrodiruyuschih konstruktsiy na osnove metoda skolzyashchego dopuska [Algorithm of solving corroding construction optimization problems based on flexible tolerance method]. *Technology audit and production reserves*, 2016, vol. 2(28), pp. 51-57. (in Russian).

12. Ashlock D. *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization*. Springer, New York 2006. 572 p.

13. Zelentsov D.G., Novikova L.V., Denysiuk O.R. Matematicheskie modeli secheniy elementov sharnirno-sterzhnevyykh konstruktsiy, podverzhennyh vozdeystviyu agresivnyh sred [Mathematical models of the cross-sections of elements of hinged-rod structures subjected to the influence of aggressive media]. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 2 (53), pp. 146-151. (in Russian).

14. Himmelblau D.M. *Applied nonlinear programming*. McGraw-Hill, 1972. 498 p.