

Зеленцов Д.Г.

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ

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

Предлагается способ повышения точности и эффективности вычисления функций ограничений в задачах оптимального проектирования конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред, при ограничении по заданной долговечности (времени работы до момента исчерпания несущей способности). Рассматривается общий случай коррозионного взаимодействия, когда механические напряжения увеличивают скорость процесса накопления геометрических повреждений. Модель процесса коррозионного деформирования конструкции включает в себя систему уравнений механики и систему дифференциальных уравнений, моделирующих процесс изменения вследствие коррозии геометрических характеристик. Правые части дифференциальных уравнений содержат функции механических напряжений, для вычисления которых используется метод конечных элементов. Таким образом, точность вычисления функций ограничений оптимизационной задачи определяется точностью численного решения системы дифференциальных уравнений. При неизменном параметре численного метода она изменяется в зависимости от варьируемых параметров, что не позволяет получить решение оптимизационной задачи с заданной точностью. В данной статье предлагается описание метода, основанного на аппроксимации погрешности приближённого решения с помощью нейронной сети и его последующего уточнения. Для получения приближённого решения системы дифференциальных уравнений используется численно-аналитический алгоритм, параметры которого не изменяются в процессе решения задачи оптимизации. Для иллюстрации предложенного метода решен ряд задач весовой оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых конструкций. Приводятся результаты обучения и тестирования нейронных сетей, а также данные численных экспериментов, подтверждающие эффективность и точность предлагаемого метода.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, оптимальное проектирование, агрессивная среда, процесс коррозионного деформирования, система дифференциальных уравнений.

DOI: 10.32434/2521-6406-2018-4-2-18-26

Постановка проблемы

Среди задач строительной механики особое место занимают задачи расчёта несущей способности и оптимального проектирования конструкций с изменяющимися во времени геометрическими характеристиками. К таким конструкциям относятся, прежде всего, конструкции, эксплуатирующиеся в агрессивных средах (АС). Влияние АС вызывает коррозионный износ – разрушение приповерхностного слоя металла, что со временем приводит к снижению

несущей способности конструкции и преждевременному, нередко аварийному выходу её из строя. В общем случае коррозионного взаимодействия механические напряжения существенно влияют на скорость коррозии, что необходимо учитывать в расчётах.

Настоящая статья посвящена проблеме оптимального проектирования конструкций, предназначенных для эксплуатации в агрессивных технологических средах. Вычисление функций ограничений в этом случае предполагает

определение долговечности конструкции по критериям прочности, жесткости или устойчивости на каждом шаге поиска оптимального проекта.

Под точностью решения оптимизационной задачи в данном случае подразумевается точность вычисления функций ограничений, которая будет определяться правильным выбором используемых при этом математических моделей, методов и алгоритмов их реализации. Для вычисления функций ограничений необходимо наличие модели коррозионного деформирования, которая позволяет определить напряжённо-деформированное состояние конструкции (НДС) в любой момент времени.

Модель коррозионного деформирования на основе метода конечных элементов (МКЭ) включает в себя систему дифференциальных уравнений (СДУ), описывающей процесс накопления геометрических повреждений. Повышение точности численного решения СДУ за счёт увеличения количества узлов временной сетки будет приводить к резкому увеличению вычислительных затрат.

В статье предлагается описание метода вычисления функций ограничений, основанного на уточнении приближённого решения с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). Применение этого метода позволяет, по мнению автора, существенно снизить вычислительные затраты при обеспечении требуемой точности. В качестве иллюстрации предлагается решение задачи весовой оптимизации шарнирно-стержневой конструкции, подверженной воздействию агрессивной среды.

Анализ последних исследований и публикаций

В данном разделе анализ публикаций по проблемам оптимального проектирования корродирующих конструкций приводится по двум направлениям: численным методам решения задачи Коши для СДУ, описывающих процесс накопления геометрических повреждений, в том числе – алгоритмам управления точностью численного решения СДУ и методам решения задач оптимизации корродирующих конструкций.

Основная проблема численных методов заключается в таком выборе их параметров, который обеспечил бы приемлемый компромисс между вычислительными затратами и точностью получаемого результата. В работе [1], посвящённой повышению эффективности численного решения систем дифференциальных уравнений, для минимизации числа арифметических операций при численном решении системы

обыкновенных дифференциальных уравнений n -го порядка применялся метод динамического программирования. В более поздних работах повышение эффективности и точности вычислительных алгоритмов осуществлялось, в том числе, путём использования формул, описывающих зависимость между параметрами сечения и агрессивной среды, напряжением, значениям глубины коррозии и временем [2,3]. В [4,5] с помощью искусственных нейронных сетей была формализована информация о влиянии на погрешность решения СДУ (помимо величины шага интегрирования) таких факторов, как начальные значения напряжений в элементе, параметры агрессивной среды и характеристики сечения (формы, площади, периметра). Применение ИНС позволило определять величину шага интегрирования СДУ в процессе решения задачи в зависимости от требуемой точности решения.

В последние десятилетия стало очевидным, что эффективное решение задачи оптимального проектирования конструкций, подверженных коррозии, невозможно без существенной модификации традиционных методов. В [6] для решения задачи весовой оптимизации ШСК был использован метод скользящего допуска; в качестве критерия скользящего допуска принималась погрешность вычисления функций ограничений. Данный метод показал высокую эффективность за счёт снижения вычислительных затрат на начальных этапах решения задач оптимизации. При этом вопрос о точности получаемого решения оставался открытым. В работе [7] был использован нейросетевой модуль, позволяющий управлять точностью вычисления функций ограничений в соответствии с критерием скользящего допуска.

В приведенных работах задача оптимизации решалась в непрерывной постановке, что позволяло в ряде случаев использовать градиентные методы. При решении задачи дискретной оптимизации наиболее перспективным представляется использование методов эволюционного моделирования [8,9], в частности, генетических методов. Это предполагает значительно более высокие вычислительные затраты по сравнению с методами математического программирования и обуславливает актуальность разработки новых эффективных методов её решения.

Формулирование цели исследования

В качестве объекта исследования в данной статье рассматриваются шарнирно-стержневые

конструкции (ШСК), предназначенные для эксплуатации в агрессивных средах. Задача весовой оптимизации может быть сформулирована следующим образом: требуется определить типы и типоразмеры стержневых элементов таким образом, чтобы объём конструкции был минимальным, и на протяжении всего заданного срока эксплуатации она сохраняла несущую способность, то есть удовлетворяла условиям прочности и устойчивости. В виде задачи нелинейного математического программирования данная постановка имеет вид:

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

$$X_D : \left\{ \bar{x} \in E^n \begin{cases} g_1(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0; \\ g_2(\bar{x}) = \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0; \\ i = \overline{1, N} \end{cases} \right\}, (1)$$

где A_i и L_i – площадь сечения и длина i -го стержневого элемента; N – количество стержней в расчётной модели; \bar{x} – вектор варьируемых параметров (типов и типоразмеров сечений); σ_i и σ_i^* – текущее напряжение и критическое напряжение потери устойчивости в i -м элементе; $[\sigma]$ – предельное значение напряжения; t^* – заданный срок эксплуатации.

Специфика оптимизационных задач такого класса заключается в следующем:

- в функции ограничений входит время;
- решение ищется на дискретном неметрическом множестве (множестве индексов).

Вычисление функций ограничений (ФО) предполагает расчёт напряжённого состояния конструкции в заданный момент времени с учётом происходящего в ней коррозионного процесса.

Моделирование процесса коррозионного деформирования предполагает решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс накопления геометрических повреждений в стержневых элементах:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot \Phi(\sigma_i(\bar{\delta})) \delta_i \Big|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N}, (2)$$

где δ_i – глубина коррозионного поражения (параметр повреждённости); v_0 – скорость коррозии при отсутствии напряжения; Φ – известная функция напряжения; t – время.

Для вычисления напряжений в правых ча-

стях (2) используются уравнения механики деформированного твёрдого тела: система уравнений равновесия и совместности деформаций, соотношения Коши и физические соотношения (для упругих тел – закон Гука). В виде системы уравнений метода конечных элементов (МКЭ) они имеют вид:

$$\begin{cases} \bar{R} = K^{-1} \cdot \bar{u} \\ \bar{\varepsilon} = D \cdot \bar{u} \\ \bar{\sigma} = E \cdot \bar{\varepsilon} \end{cases}, (3)$$

где K , D , E – матрицы жёсткости, дифференцирования и упругости; \bar{R} , \bar{u} , $\bar{\varepsilon}$ и $\bar{\sigma}$ – векторы узловых нагрузок, перемещений, деформаций и напряжений.

Для шарнирно-стержневых конструкций матрица жесткости конечного элемента имеет вид:

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & \sin \alpha \\ -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, (4)$$

где E – модуль упругости конструкционного материала.

Так как площади сечений элементов изменяются в процессе коррозионного износа, то элементы матрицы жесткости конструкции, а, следовательно, и напряжения в элементах, являются переменными во времени.

Таким образом, вычисление ФО оптимизационной задачи сводится к численному решению задачи Коши для СДУ (2) совместно с решением задачи МКЭ (3)–(4).

Целью работы является разработка метода, который позволит минимизировать вычислительные затраты и одновременно обеспечить высокую точность вычисления функций ограничений.

Изложение основного материала исследования

Предлагаемый метод основывается на численно-аналитическом алгоритме решения СДУ вида (2) и нейронной сети, аппроксимирующей погрешность этого решения.

Численно-аналитический алгоритм решения СДУ, описывающей процесс накопления повреждений, использует формулу, устанавливающую связь между глубиной коррозионного поражения, геометрическими характеристиками

сечения стержня, напряжением, параметрами агрессивной среды и временем. Данная формула учитывает влияние глубины коррозионного поражения на изменение напряжения, но игнорирует влияние изменения осевого усилия. Таким образом, для статически определимых корродирующих ШСК (когда внутренние усилия в стержнях постоянны) она позволяет получить точное решение задачи долговечности. Погрешность решения задачи для статически неопределимых конструкций будет определяться только степенью изменения внутренних усилий.

В качестве модели накопления геометрических повреждений будем использовать кинетическое уравнение вида:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0(1 + k\sigma), \tag{5}$$

где k – коэффициент влияния напряжения на скорость коррозионного процесса.

Возможность использования уравнения (2) при моделировании процессов коррозионного деформирования обоснована в монографии [2].

Будем предполагать, что осевое усилие в стержневом элементе постоянно: $Q = \text{const}$. Тогда изменение во времени напряжения будет вызвано лишь изменением площади сечения:

$$\sigma(\delta) = \frac{Q}{A_0 - P_0 \cdot \delta + a\delta^2}, \tag{6}$$

где A_0 и P_0 – площадь и периметр сечения в начальный момент времени; a – коэффициент формы сечения.

Подставляя (6) в (5) и интегрируя полученное уравнение, после несложных преобразований получим значение времени t^* , соответствующему предельному значению глубины коррозионного поражения δ^* :

$$t^* = \frac{\delta^*}{v_0} - \frac{2kQ}{v_0 d} \times \ln \left\{ \frac{(P_0 + d - 2a \cdot \delta^*)(P_0 - d)}{(P_0 - d - 2a \cdot \delta^*)(P_0 + d)} \right\}. \tag{7}$$

В (7) приняты следующие обозначения:

$$c = A_0 + kQ, \quad d = \sqrt{P_0^2 - 4ac}.$$

Предельное значение δ^* определяется из условий прочности, устойчивости и сплошнос-

ти сечения.

В численно-аналитическом алгоритме решения СДУ (2) задаётся приращение глубины коррозии $h_d^s = d^s - d^{s-1} = \text{const}$ (рис. 1), а соответствующее ему приращение времени h_t^s определяется по формуле:

$$h_t^s = \frac{h_\delta^s}{v_0} - \frac{2kQ^{s-1}}{v_0 d} \times \ln \left\{ \frac{(P^{s-1} + d - 2ah_\delta^s)(P^{s-1} - d)}{(P^{s-1} - d - 2ah_\delta^s)(P^{s-1} + d)} \right\}. \tag{8}$$

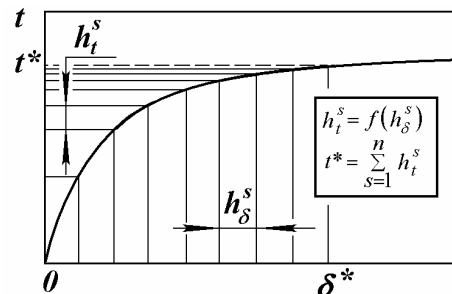


Рис. 1. Графическая иллюстрация алгоритма

В каждом узле конечно-разностной сетки решается система уравнений механики (3). Таким образом, в течение промежутка времени h_t^s учитывается изменение площади сечения, но игнорируется изменение осевого усилия. Последнее и обуславливает погрешность решения.

На изменение внутренних усилий в стержневых элементах ШСК оказывает влияние большое количество факторов, в том числе топология конструкции, граничные условия и условия нагружения. Учесть их влияние до решения задачи не представляется возможным.

Предположим, что нам известен закон изменения внутреннего усилия в том стержневом элементе, долговечность которого определяет долговечность конструкции в целом, а также известно приближённое решение, полученное с помощью численно-аналитического алгоритма при фиксированном количестве узлов. В этом случае можно построить функцию, аппроксимирующую погрешность приближённого решения на основе ранее неучтённых факторов.

Так как долговечность конструкции, как отмечалось ранее, определяется долговечностью какого-либо одного её элемента, то решение задачи (2)–(4) будет совпадать с решением задачи расчёта долговечности для единственного

стержня с соответствующими характеристиками сечения и известным законом изменения осевого усилия. Напряжение в стержне определится следующим образом:

$$d = \sqrt{P_0^2 - 4ac} . \quad (9)$$

Аналитическое решение дифференциального уравнения, получаемого путём подстановки (9) в (5) невозможно, с другой стороны, в качестве эталонного решения можно использовать численное решение, погрешность которого может быть сколь угодно малой.

Зависимости $Q=Q(t)$ можно получить на основании результатов приближённого решения. Если аппроксимировать её полиномом степени три:

$$Q(t)=Q_0+\alpha_1t+\alpha_2t^2+\alpha_3t^3,$$

то для определения коэффициентов полинома можно использовать значения внутренних усилий в стержневых элементах в четырёх узлах конечно-разностной сетки, включая тот, который соответствует начальному моменту времени.

На рис. 2 приведена искусственная нейронная сеть, которая используется для аппроксимации погрешности приближённого решения при активных ограничениях по прочности. Входными параметрами сети являются начальная площадь A_0 и периметр P_0 сечения, начальное значение напряжения σ_0 , параметр агрессивной среды v_0 и коэффициенты полинома $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Выходной параметр сети – погрешность при-

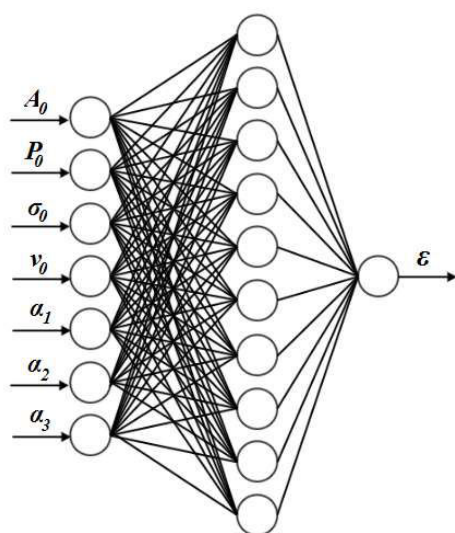


Рис. 2. Архитектура нейронной сети

ближённого решения.

В общем виде алгоритм предложенного метода может быть представлен следующим образом.

1. Для данного вектора варьируемых параметров решается задача напряжённо-деформированного состояния и находятся начальные значения усилий и напряжений в стержнях. На основании полученных значений с использованием (7) вычисляется долговечность всех элементов и определяется элемент, которому соответствует минимальное её значение (в дальнейшем – ведущий элемент).

2. С использованием численно-аналитического метода решается система дифференциальных уравнений вида (2); количество узлов конечно-разностной сетки при этом определяется степенью полинома, описывающем изменение усилий в ведущем элементе. Результатом этого этапа является приближённое значение задачи долговечности и значения коэффициентов аппроксимирующего полинома.

3. На основании данных о параметрах сечения ведущего элемента, начального напряжения в нём и коэффициентов аппроксимирующего полинома с использованием ИНС вычисляется погрешность приближённого решения.

4. На основании приближённого решения задачи долговечности и его погрешности получается уточнённое решение.

Для численной иллюстрации предложенного метода был решён ряд задач весовой оптимизации корродирующих ШСК со стержнями, изготовленными из фасонных профилей (рис. 3). В качестве варьируемых параметров принимались тип (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголки) и типоразмер профиля. Для решения задачи оптимизации использовался целочисленный генетический алгоритм. Множество решений задачи и способ кодирования хромосомы показаны на рисунках 4 и 5.

Общая схема решения задачи оптимизации с помощью предложенного метода приведена на рис. 6. Блоки, показанные на схеме, имеют следующее назначение: «ГА» – реализация генетического алгоритма; «ЦФ» – вычисление значения целевой функции; «НДС» – решение задачи напряжённо-деформированного состояния методом конечных элементов; «СДУ» – численно-аналитическое решение СДУ вида (2); «НС» – определение погрешности численного решения СДУ с помощью ИНС.

Нейронные сети, аппроксимирующие погрешность численно-аналитического решения

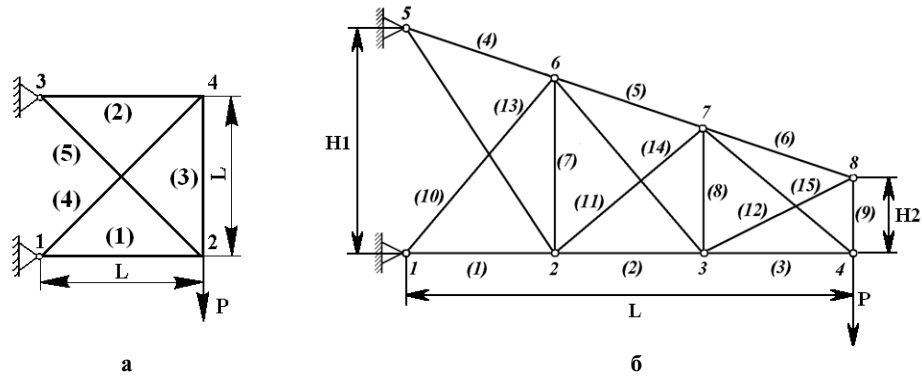


Рис. 3. Расчётные схемы конструкций

обучались для каждого типа сечения с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Оптимальная структура нейронных сетей определялась с помощью методик, приведенных в [10].

	Уголок неравнополочный	Уголок равнополочный	Швеллер	Двутавр	
55,0	100,0	4,5	7,2	Профиль № 10	
64,0	120,0	4,8	7,3	Профиль № 12	
...	
140,0	330,0	7,0	11,2	Профиль № 33	
H	B	D	T		

Рис. 4. Множество решений оптимизационной задачи

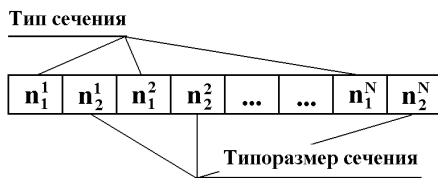


Рис. 5. Способ кодирования хромосомы

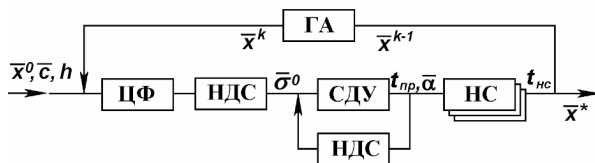


Рис. 6. Схема решения задачи оптимизации

В табл. 1 приведены результаты тестирования ИНС для растягиваемого стержня двутаврового профиля.

Объём тестовой выборки составил 1000 образцов. Максимальная ошибка сети составила 3,26%.

Таблица 1

Результаты тестирования нейронной сети

<0,2%	0,2–0,4%	0,4–0,6%	0,6–0,8%	0,8–1,0%	>1,0%
332	282	162	106	72	46

В табл. 2 приведены результаты вычисления долговечности пятистержневой ШСК (рис. 3,а).

Таблица 2

Результаты тестирования метода

№ задачи	$t_{эт}$, лет	$t_{пр}$, лет	$\epsilon_{нс}$, %	$t_{ут}$, лет	ϵ , %
1	2,3217	2,2084	5,71	2,3345	0,55
2	2,5914	2,7345	6,01	2,5702	0,81
3	1,5727	1,5023	4,95	1,5767	0,25
4	1,6659	1,6925	2,03	1,6608	0,31
5	1,8382	1,8732	1,75	1,8404	0,11

В табл. 2 приведены: номер решаемой задачи, эталонное решение, приближённое решение, полученное на четырёх узлах сетки, погрешность приближённого решения (выходной параметр нейронной сети), уточнённое на основании величины погрешности решение и погрешность уточнённого решения относительно эталонного. Задачи отличались типами и типоразмерами стержневых элементов:

- задача 1 – равнополочный уголок 125×129×9;
- задача 2 – неравнополочный уголок 140×90×10;
- задача 3 – двутавр 160×81;
- задача 4 – швеллер 180×70;
- задача 5 – швеллер 200×76.

Как следует из приведенных результатов, точность решения не зависит от геометрических характеристик сечения, вида ограничений и значений начальных напряжений.

Некоторые результаты, подтверждающие

высокую эффективность предложенного метода приводятся в табл. 3. Здесь показано сравнение вычислительных затрат различных методов вычисления функций ограничений для предельно допустимой погрешности $\epsilon^*=1\%$. Задача оптимизации решалась для пяти- и пятнадцатистержневой ШСК (рис. 3) с использованием генетического алгоритма. В качестве меры эффективности принималось количество обращений к процедуре МКЭ:

– при использовании для вычисления Φ_0 фиксированного шага по времени, при котором погрешность вычисления не превышает ϵ^* на всём множестве варьируемых параметров;

– при использовании нейросетевого модуля управления точностью [5];

– при использовании нейросетевого модуля управления точностью и метода скользящего допуска [7];

– при использовании предложенного автором метода.

Таблица 3
Анализ эффективности метода

Метод	Количество обращений к процедуре МКЭ	
	5-стержневая ШСК	15-стержневая ШСК
ГА	3 375 141	10 287 508
НС+ГА	1 522 317	3 618 484
МСД+НС+ГА	565 944	1 528 043
Метод уточнения	46 714	94 396

Данные для первых трёх методов приведены в [11].

Выводы

Метод, основанный на использовании нейронных сетей для аппроксимации погрешности приближённого решения задачи долговечности корродирующих конструкций и его последующего уточнения позволил существенно снизить вычислительные затраты при одновременном обеспечении требуемой точности. Применение предложенного метода является наиболее эффективным при решении задач оптимального проектирования конструкций такого класса, так как задача долговечности решается на каждой итерации оптимизационного алгоритма при вычислении функций ограничений.

Полученные при проведении численных экспериментов результаты подтверждают правильность выбранного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротченко А.Т.* О применении метода динамического программирования к оптимальному интегрированию системы дифференциальных уравнений // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюз. межвуз. сб. / ГГУ. – Горький 1976. – Вып.4. – С.95-97.

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

3. *Зеленцов Д.Г., Новикова Л.В.* Анализ эффективности численно-аналитических алгоритмов решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений // Современный научный вестник. Технические науки. Физика. – 2014. – № 18(214). – С.54-61.

4. *Короткая Л.И.* Использование нейронных сетей при численном решении некоторых систем дифференциальных уравнений // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 3/4(51). – С.24-27.

5. *Денисюк О.Р.* Определение рациональных параметров численного решения систем дифференциальных уравнений // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2016. – № 3(58). – С.208-212.

6. *Радуль О.А.* Оптимальне проектування кородуючих конструкцій з використанням штучних нейронних мереж // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2012. – № 1. – С.16-18.

7. *Денисюк О.Р.* Моделі та методи керованого за точністю чисельного аналізу кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій: Автореф. дис...канд. техн. наук 01.05.02 / Харківський нац. ун-т ім. В.Н. Каразіна. – Харків, 2017. – 20 с.

8. *Alapati M.* Discrete Optimization of Truss Structure Using Genetic Algorithm // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. – 2014. – Vol.3. – Issue 1. – P.105-111.

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

10. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

Поступила в редакцию 26.10.2018

НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ**Зеленцов Д.Г.**

Пропонується спосіб підвищення точності і ефективності обчислення функцій обмежень в задачах оптимального проектування конструкцій, що підлягають впливу агресивних середовищ, при обмеженні з заданою довговічністю (часу роботи до моменту вичерпання несучої здатності). Розглядається загальний випадок корозійної взаємодії, коли механічні напруження збільшують швидкість процесу накопичення геометричних пошкоджень. Модель процесу корозійного деформування конструкції включає до себе систему рівнянь механіки і систему диференціальних рівнянь, що моделюють процес зміни внаслідок корозії геометричних характеристик. Праві частини диференціальних рівнянь містять функції механічного напруження, для обчислення яких використовується метод скінченних елементів. Таким чином, точність обчислення функцій обмежень оптимізаційної задачі визначається точністю чисельного розв'язку системи диференціальних рівнянь. При незмінному параметрі чисельного методу вона змінюється в залежності від змінних параметрів, що не дозволяє отримати розв'язок оптимізаційної задачі з заданою точністю. У даній статті пропонується опис методу, заснованого на апроксимації похибки наближеного розв'язку за допомогою нейронної мережі і його подальшого уточнення. Для отримання наближеного розв'язку системи диференціальних рівнянь використовується чисельно-аналітичний алгоритм, параметри якого не змінюються в процесі розв'язання задачі оптимізації. Для ілюстрації запропонованого методу одержано розв'язки низки задач вагової оптимізації кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій. Наводяться результати навчання і тестування нейронних мереж, а також дані про чисельні експерименти, що підтверджують ефективність і точність запропонованого методу.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, оптимальне проектування, агресивне середовище, процес корозійного деформування, система диференціальних рівнянь.

NEURAL NETWORKS AS A MEANS OF INCREASING THE ACCURACY AND EFFICIENCY OF SOLVING THE OPTIMIZATION PROBLEMS**Zelentsov D. G.****Ukrainian State University of Chemical Engineering, Dnipro, Ukraine**

A method is proposed for increasing the accuracy and efficiency of calculating constraint functions in problems of optimal design of structures exposed to aggressive media, with constraints on a given durability (operation time until the bearing capacity is exhausted). The general case of corrosion interaction is considered, when mechanical stresses increase the speed of the process of geometric damage accumulation. The model of the process of corrosion deformation of a structure includes a system of mechanics equations and a system of differential equations that simulate the process of change in geometric characteristics due to corrosion. The right-hand sides of differential equations contain mechanical stress functions, which are calculated using the finite element method. Thus, the accuracy of calculating the constraint functions of the optimization problem is determined by accuracy of a numerical solution of the system of differential equations. With a constant parameter of the numerical method, the accuracy changes depending on the variable parameters, which does not allow one to obtain a solution for the optimization problem with a given accuracy. This article offers a description of the method based on approximation of an approximate solution error using a neural network and its subsequent refinement. To obtain an approximate solution of a system of differential equations, a numerical-analytical algorithm is used. Its parameters do not change in the process of solving an optimization problem. To illustrate the proposed method, a number of problems of weight optimization of corroding trusses have been solved. The results of training and testing of neural networks, as well as data from numerical experiments, confirming the effectiveness and accuracy of the proposed method are presented.

Keywords: artificial neural network, optimal design, aggressive media, process of corrosion deformation, system of differential equations.

REFERENCES

1. Korotchenko A.T. O primeneniі metoda dinamicheskogo programmirovaniya k optimalnomu integrirovaniyu sistemy differentsialnykh uravneniy [On the application of the dynamic programming method to the optimal integration of a system of differential equations]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Vsesojuzn. mezhvuz. sb.* [Applied problems of strength and plasticity. All-Union. interuniversity collection]. GGU, Gor'kij, 1976, vol. 4, pp.95-97. (in Russian).
2. Zelentsov D.G., Liashenko O.A., Naumenko N.Yu. *Informatsionnoe obespecheniye raschetov korrodiruyushchikh ob'ektov. Matematicheskiye modeli I kontseptsiya proyektirovaniya sistem.* [Information support for the calculations of corrosive objects. Mathematical models and the concept of system design]. Dnepropetrovsk: Ukrainian State University of Chemical Technology Publ., 2012, 264 p. (in Russian).
3. Zelentsov D.G., Novikova L.V. Analiz effektivnosti chislenno-analiticheskikh algoritmov resheniya nekotorykh klassov sistem differentsial'nykh uravneniy [Analysis of the effectiveness of numerical-analytical algorithms for solving some classes of systems of differential equations] *Sovremennyy nauchnyy vestnik. Tekhnicheskkiye nauki. Fizika.* [Modern Scientific Bulletin. Technical science. Physics]. 2014, №18 (214), pp.54–61. (in Russian).
4. Korotkaya L.I. Ispol'zovaniye neyronnykh setey pri chislennom reshenii nekotorykh sistem differentsial'nykh uravneniy. [The use of neural networks in the numerical solution of some systems of differential equations]. *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy.* [East European Journal of Advanced Technologies]. 2011, №3/4 (51), pp.24–27. (in Russian).
5. Denisyuk O.R. Opredeleniye ratsional'nykh parametrov chislennogo resheniya sistem differentsial'nykh uravneniy. [Determination of rational parameters for the numerical solution of systems of differential equations]. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta.* [Bulletin of the Kherson National Technical University]. 2016, №3 (58), pp.208-212. (in Russian).
6. Radul O.A. Optymalne proektuvannya koroduyuchykh konstruksiy z vykorystanniam shtuchnykh neyronnykh merezh. [Optimal design of corroding structures using artificial neural networks]. *Promyslove budivnitstvo ta izhenzhenerni sporudy.* [Industrial Construction and Engineering Facilities]. 2012, №1, pp.16–18. (in Ukrainian).
7. Denisyuk O.R. Modeli ta metody kerovanoho za tochnisty chyselnoho analizu koroduyuchykh sharnirno-sterzhnevyykh konstruksiy. [Models and methods for the numerical analysis of corroding hinge-rod structures controlled by accuracy]: Author's abstract. dis ... Candidate of Technical Sciences 01.05.02 / Kharkivskiy natsionalniy universitet im. V.N. Karazina. [Kharkiv national University them. V.N. Karazin]. Kharkiv, 2017, 20 p. (in Ukrainian).
8. Alapati M. Discrete Optimization of Truss Structure Using Genetic Algorithm // *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology.* 2014, Vol.3, Issue 1. P.105–111.
9. Ashlock D. *Evolutionary Computation for Modeling and Ottimization.* New York, Springer, 2006, 572 p.
10. Haykin S. *Neyronnyye seti: polnyy kurs.* [Neural networks: a Comprehensive Foundation]. M.: Publishing House "Williams", 2006, 1104 p. (in Russian).