УДК 519.6:004.942

Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В МЕТОДАХ ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ ПЛОСКОНАПРЯЖЁННЫХ ПЛАСТИН

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

Предлагается адаптация метода скользящего допуска применительно к задачам оптимального проектирования корродирующих плосконапряжённых пластин при ограничении по заданной долговечности (времени работы до момента исчерпания несущей способности). Рассматривается общий случай коррозионного взаимодействия, когда механические напряжения интенсифицируют процесс накопления геометрических повреждений. Модель процесса коррозионного деформирования пластины включает в себя систему уравнений механики (плоской задачи теории упругости) и систему дифференциальных уравнений, моделирующих процесс изменения толщины пластины по пространственным и временной координатам. Правые части дифференциальных уравнений содержат функции механических напряжений, для вычисления которых используется метод конечных элементов. Погрешность решения задачи напряжённо-деформированного состояния может быть уменьшена до приемлемого значения, в том числе, с использованием модифицированных конечных элементов переменной толщины, при этом она не зависит от текущего значения вектора варьируемых параметров. Таким образом, точность вычисления функций ограничений оптимизационной задачи определяется, главным образом, 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. Использование нейросетевого алгоритма позволит определить параметр численного решения в зависимости от допустимой погрешности и текущего значения вектора варьируемых параметров на каждой итерации решения оптимизационной задачи. Стратегия метода скользящего допуска позволяет регулировать погрешность вычисления функций ограничений в процессе решения задачи, что позволяет обеспечить заданную точность решения при минимальных вычислительных затратах. Для иллюстрации метода решена задача весовой оптимизации плосконапряжённой пластины. Приводятся результаты численных экспериментов, подтверждающие эффективность и точность предлагаемого метода.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, агрессивная среда, процесс коррозионного деформирования, система дифференциальных уравнений, плосконапряжённые корродирующие пластины, метод скользящего допуска, искусственная нейронная сеть.

Постановка проблемы

В данной статье рассматриваются конструкции, подвергающиеся в процессе эксплуатации воздействию агрессивных сред, которые вызывают коррозионный износ – разрушение приповерхностного слоя металла. При решении задач оптимального проектирования таких конструкций вычислительные затраты при вычислении функций ограничений несопоставимо выше затрат при вычислении целевой функции. Вычисление функций ограничений (ФО) в этом случае предполагает определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции в какой-либо момент времени или определение долговечности конструкции по критериям прочности, жесткости или устойчивости на каждом шаге поиска оптимального проекта. Точность решения оптимизационных задач будет определяться главным образом точностью вычисления функций ограничений, а, следовательно, и правильным выбором используемых при этом математических моделей, методов и алгоритмов их реализации.

Использование метода конечных элементов (МКЭ) в модели коррозионного деформирования конструкций позволяет с приемлемой точностью определить их НДС в заданный момент времени, долговечность отдельных элементов и всей конструкции в целом. Конечно-элементная модель определяет размерность системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающей процесс накопления геометрических повреждений. Очевидно, что повышение точности численного решения СДУ за счёт увеличения количества узлов временной сетки будет приводить к резкому увеличению вычислительных затрат.

В настоящей статье рассмотрена обобщенная постановка задачи оптимизации и предложен новый алгоритм её решения, использующий искусственные нейронные сети (ИНС). Применение нейросетевого модуля управления погрешностью вычисления функций ограничений в методе скользящего допуска позволяет, по мнению авторов, повысить его эффективность при обеспечении требуемой точности.

Анализ последних исследований и публикаций

В данной части анализ публикаций по проблемам оптимального проектирования корродирующих конструкций приводится по трём направлениям: моделям корродирующей поверхности, использующих МКЭ; численным методам решения задачи Коши для СДУ, описывающих процесс накопления геометрических повреждений; алгоритмам управления точностью численного решения СДУ и методам решения задач оптимизации корродирующих конструкций.

Использование конечных элементов (КЭ), спроектированных без учета коррозионных процессов, предполагает нулевой порядок аппроксимации функции толщины и не позволяет построить адекватную модель процесса коррозионного деформирования. В монографии [1] предложено описание модифицированных КЭ переменной толщины для решения плоской задачи теории упругости с учетом коррозионного износа: прямоугольного и четырехугольного с 8 степенями свободы и треугольного с 12 степенями свободы. В этих КЭ функция толщины аппроксимируется полиномом второй степени, что позволяет существенно сократить их количество в конечно-элементной модели и, следовательно, уменьшить размерность СДУ.

Очевидно, одной из первых работ, посвящённой повышению эффективности численного решения систем дифференциальных уравнений, следует считать [2]. В данной работе применялся метод динамического программирования к задаче минимизации числа арифметических операций при интегрировании системы обыкновенных дифференциальных уравнений n-го порядка за счёт регулирования длины шага интегрирования. В более поздних работах повышение эффективности и точности вычислительных алгоритмов осуществлялось посредством их модификации, в том числе – использованием аналитических зависимостей между параметрами сечения и агрессивной среды, напряжением, предельным значениям глубины коррозии и временем [3]. Однако количественных оценок погрешностей решения в этих работах приведено не было.

Более перспективным представляется подход, основанный на формализации информации о влиянии на погрешность решения (помимо величины шага интегрирования) таких факторов, как начальные значения напряжений в элементе, параметры агрессивной среды и, для стержневых конструкций, характеристики его сечений (формы, площади, периметра). Такая формализация была осуществлена с помощью искусственных нейронных сетей [4,5] при исследовании шарнирно-стержневых конструкций. Применение ИНС позволило определять величину шага интегрирования СДУ в процессе решения задачи в зависимости от требуемой точности решения.

Описание методов математического программирования, применявшихся для решения задач оптимизации корродирующих конструкций до конца прошлого столетия, достаточно полно приведено в обзоре [6]. В последние десятилетия стало очевидным, что использование существующих методов оптимизации без их существенной модификации не позволяет эффективно решать задачи данного класса. В частности, использование в качестве критерия скользящего допуска погрешность вычисления функций ограничений позволило существенно повысить эффективность соответствующего метода за счёт снижения вычислительных затрат на начальных этапах решения задач оптимизации [7]. К сожалению, в этом случае вопрос о точности получаемого решения оставался открытым.

Использование для решения задач дискретной оптимизации конструкций методов эволюционного моделирования [8,9], в частности, генетических методов, предполагает значительно более высокие вычислительные затраты по сравнению с методами математического программирования.

Формулирование цели исследования

Как объект исследования будем рассматривать плосконапряжённые пластины, подверженные коррозионному износу. Задача оптимального проектирования формулируется следующим образом: требуется распределить материал по области пластины таким образом, чтобы её объём был минимальным, и на протяжении всего заданного срока эксплуатации она сохраняла несущую способность, то есть удовлетворяла условиям прочности. В виде задачи нелинейного математического программирования данная постановка имеет вид:

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

$$X_D : \left\{ \bar{x} \in E^n \left| \begin{array}{l} g(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \ge 0; \\ i = \overline{1, N} \end{array} \right. \right\}. \quad (1)$$

Здесь A_i – площадь i-го КЭ; N – количество КЭ в конечно-элементной модели; $\bar{x}$ – вектор варьируемых параметров (толщин); σ_i – текущее напряжение в i-м КЭ; $[\sigma]$ – предельное значение напряжения; t^* – заданный срок эксплуатации.

Специфика оптимизационных задач такого класса заключается в том, что в функции ограничений входит время.

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

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

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \left(1 + k\sigma_{eq}\right), \quad (2)$$

где δ – глубина коррозионного поражения (параметр повреждённости); t – время; v_0 – скорость коррозии при отсутствии напряжения; k – коэффициент влияния напряжения на скорость коррозии; σ_{eq} – эквивалентное напряжение, при котором коррозионный процесс при сложном напряжённом состоянии будет происходить с той же скоростью, что и в условиях простого напряжённого состояния.

Обоснование возможности использования уравнения (2) при моделировании процессов коррозионного деформирования приводится в монографии [3].

Систему дифференциальных уравнений, моделирующую процесс коррозионного деформирования пластины можно представить в виде:

$$\begin{aligned} &\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \left(1 + k\sigma_{eq\,i}\left(\bar{\delta}\right)\right); \\ &\delta_i \Big|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, K}. \end{aligned} \quad (3)$$

Размерность СДУ определяется, как отмечалось выше, количеством КЭ в конечно-элементной модели (при использовании КЭ постоянной толщины) или количеством узловых точек (при использовании КЭ переменной толщины).

Правые части СДУ содержат функции механических напряжений. Для вычисления напряжений 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:

$$\begin{cases} \bar{R} = K^{-1} \cdot \bar{u}; \\ \bar{\varepsilon} = D \cdot \bar{u}; \\ \bar{\sigma} = E \cdot \bar{\varepsilon}. \end{cases} \quad (4)$$

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.

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

Очевидно, что система (3) может быть решена только численно, причём решение задачи МКЭ (4) осуществляется в каждом узле временной сетки. Именно это определяет уровень вычислительных затрат, который нелинейно возрастает при увеличении размерности задачи МКЭ и, как следствие, размерности СДУ.

На погрешность вычисления ФО, таким образом, будут влиять погрешности конечно-элементной модели и численного решения СДУ. При этом погрешность решения СДУ при неизменных параметрах вычислительной процедуры будет изменяться на каждой итерации решения задачи оптимизации. Прогнозировать погрешность полученного результата в этом случае невозможно.

Ниже предлагается описание адаптированного метода скользящего допуска, использующего искусственную нейронную сеть, который, по мнению авторов, позволит существенно снизить вычислительные затраты при одновременном обеспечении требуемой точности решения.

Изложение основного материала исследования

Стратегия метода скользящего допуска (МСД) состоит в том, что система ограничений исходной оптимизационной задачи преобразуется к виду:

$$X_D : \{\overline{x} \in E^n \mid g(\overline{x}) = Y(k) - T(\overline{x}, t^*) \geq 0\}, \qquad (5)$$

где Y – критерий скользящего допуска (КСД) – убывающая функция номера итерации k при решении задачи нелинейного программирования (НЛП), T – функционал над всем множеством функций ограничений. В качестве Y предлагается принять допустимую погрешность вычисления ФО, в качестве T – 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. Точка пространства решений может быть классифицирована как допустимая, почти допустимая и недопустимая.

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.

Выбор функции критерия скользящего допуска во многом определяется методом решения задачи НЛП и не представляет затруднений. Вычисление функционала T предполагает решение задачи управления погрешностью вычислений ФО.

Остановимся подробнее на алгоритме управления погрешностью. Представим входные данные, необходимые для вычисления ФО в виде 4-х векторов: $\overline{x}$ – вектор варьируемых параметров; $\overline{y}$ – вектор параметров конструкции; $\overline{c}$ – вектор параметров агрессивной среды (АС), $\overline{h}$ – вектор параметров вычислительных процедур. Вектора $\overline{y}$ и $\overline{c}$ изменяются при переходе к новой задаче, вектор $\overline{x}$ изменяется в процессе решения данной задачи. Если при этом вектор $\overline{h}$ остаётся неизменным, то при любом изменении какого-либо элемента первых трёх векторов погрешность вычисления ФО будет меняться. Контролировать погрешность, а, тем более, управлять ею при таком подходе невозможно. Необходимо научиться определять параметры вычислительных процедур в процессе решения задачи оптимизации на основании информации о параметрах конструкции (варьируемых и постоянных), параметрах АС и величины допустимой погрешности. Другими словами, необходимо получить аппроксимирующую функцию, формализующую эту зависимость. Для этого следует решить следующие частные задачи:

– выбрать алгоритм решения СДУ и параметр управления;

– определить значимые параметры и способ аппроксимации;

– построить аппроксимирующую функцию.

Рассмотрим подробнее задачу получения эталонных решений для построения аппроксимирующей функции и сформулируем условия её решения.

1. Исходная СДУ путём внесения в неё некоторых изменений может быть преобразована в новую, для которой получить эталонное решение не представляет труда.

2. Погрешности численных решений обеих систем не должны существенно отличаться на заданном множестве значений параметра вычислительной процедуры. Решения этих двух систем могут при этом отличаться весьма существенно.

Исследуем СДУ (3) более детально. На изменение напряжений в конечных элементах будут влиять два фактора: изменение толщин этих элементов h_i и изменение внутренних усилий в них Q_i:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0\left[1 + k\sigma_i\left(h_i\left(\delta_i\right), Q_i\left(\overline{\delta}\right)\right)\right];$$
$$\delta_i\Big|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \qquad (6)$$

Первый фактор учесть относительно несложно, так как величина коррозионного поражения в i-м элементе определяется величиной напряжения только в этом элементе. При постоянном значении усилий СДУ вида (3) в этом случае вырождается в простую совокупность несвязанных дифференциальных уравнений, отличающихся лишь параметрами.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot \left[1 + k\sigma_i\left(h_i\left(\delta_i\right), Q_i\right)\right];$$
$$\delta_i\Big|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \tag{7}$$

Долговечность любого элемента в рамках принятой модели коррозионного износа может быть определена аналитически, то есть точно. Таким образом, решение задачи прогноза долговечности статически определимых плосконапряжённых пластин сводится к решению независимых дифференциальных уравнений.

Для получения формулы долговечности будем рассматривать фрагмент пластины как стержень прямоугольного сечения при одноосном нагружении.

Для простого напряженного состояния напряжения в элементе толщиной h(t) напряжения в области D определятся следующим образом:

$$\sigma_{eq}\left(t\right) = \frac{q_{eq}}{h\left(t\right)}, \tag{8}$$

где q_{eq} – интенсивность эквивалентного усилия в плоскости элемента.

Дифференцируя (8) по времени после несложных преобразований получим дифференциальное уравнение, определяющее связь между начальным и конечным эквивалентными напряжениями, начальной толщиной элемента, параметрами агрессивной среды и временем:

$$\frac{d\sigma_{eq}}{dt} = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_{eq\,0}} \cdot \frac{v_0}{h_0}\left(1 + k\sigma_{eq}\right). \tag{9}$$

Интегрируя (9), получим окончательно:

$$t = \frac{h_0}{v_0}\sigma_{eq\,0}\left[k \ln\frac{\sigma_{eq\,0}\left(1 + k\sigma_{eq}\right)}{\sigma_{eq}\left(1 + k\sigma_{eq\,0}\right)} + \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{eq\,0}}{\sigma_{eq}\sigma_{eq\,0}}\right]. \tag{10}$$

Это решение может также служить приближённой оценкой долговечности статически неопределимых конструкций. Его погрешность будет определяться степенью изменения усилий в границах конечных элементов.

В статически неопределимых конструкциях усилие в данном элементе зависит от изменяющихся во времени толщин всех элементов. Именно это определяет связь между уравнениями системы (3).

Долговечность всей конструкции, очевидно, будет определяться временем жизни наименее долговечного элемента. Таким образом, первое из двух условий получения эталонного решения выполнено. Так как скорость изменения толщины КЭ значительно выше, чем скорость изменения узловых усилий, что доказано большим объёмом численных экспериментов, то выполняется и второе условие. На основании этого можно сделать вывод о том, что система (7) не может использоваться для вычисления ФО ввиду того, что изменение внутренних усилий может быть весьма значительным, но может использоваться для получения аппроксимирующей функции, которая строится для отдельного элемента плосконапряжённой пластины.

Для аппроксимации зависимости между параметром численного алгоритма решения СДУ, начальными значениями толщины элемента пластины и напряжения в нём, параметрами АС и допустимой погрешностью решения предлагается использовать искусственную нейронную сеть (рис. 1). Входными параметрами сети являются: начальные значения напряжения s_0 и толщины пластины h_0, параметры коррозионного процесса v_0 и k и предельно допустимая погрешность вычисления функций ограничений ε. Выходной параметр сети – расстояние между узлами временной сетки h_t при численном решении СДУ (3).

Нейронная сеть обучалась с помощью алгоритма обратного распространения ошибки.

Общая схема решения задачи оптимального проектирования корродирующих плосконапряжённых пластин с помощью адаптированного метода скользящего допуска показана на рис. 2.

Блоки, показанные на схеме, имеют следующее назначение: «ЦФ» – вычисление значения целевой функции; «НДС» – решение задачи напряжённо-деформированного состояния (решение системы (4)); «НС» – определение параметра численного решения СДУ с помощью ИНС; «СДУ» – численное решение СДУ (3);

«НЛП» – решение задачи нелинейного математического программирования.

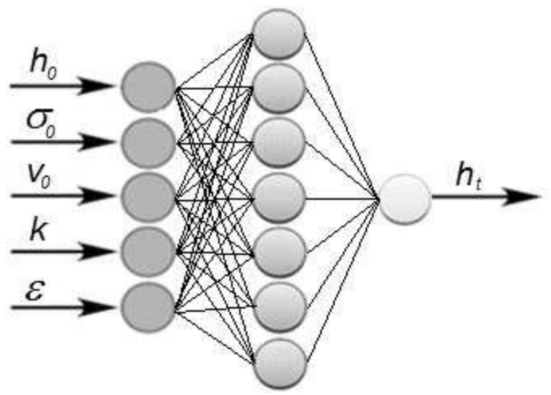

Рис. 1. Архитектура нейронной сети

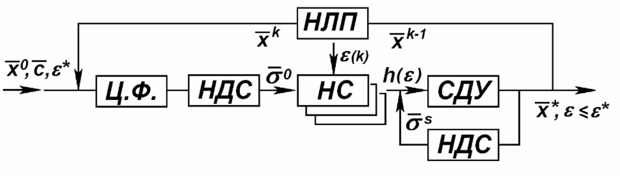

Рис. 2. Схема решения задачи оптимизации методом скользящего допуска

Задача условной оптимизации приводится к задаче на безусловный экстремум методом штрафных функций:

$$P(\overline{x}) = F(\overline{x}) + H_i \frac{\left|t(\overline{x}, h_t(\overline{x}, \varepsilon_s) - t^*\right|}{t^*};$$

$$H_i = \begin{cases} 0, & \text{если } t \ge t^*; \\ H^*, & \text{если } t < t^*. \end{cases} \qquad (11)$$

Здесь H^* – штрафной коэффициент; $t(\overline{x}, h_t(\overline{x}, s))$ – долговечность конструкции, полученная в результате численного решения СДУ (3) при шаге интегрирования h_t; ε_s – допустимая погрешность, зависящая от номера итерации s решения задачи НЛП (критерий скользящего допуска).

Предлагается следующая зависимость КСД от номера итерации:

$$Y(s) = \varepsilon_s = \varepsilon_{max} - \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{n} \cdot \mathrm{int}(\frac{s \cdot n}{k_{max}}), \qquad (12)$$

где k_{max} – максимальное количество итераций; n – количество шагов изменения КСД.

Как следует из (12), данная модификация МСД предполагает дискретное изменение КСД.

Для решения безусловно-экстремальной задачи использовался метод деформируемого многогранника (МДМ). Количество шагов изменения КСД привязывалось к количеству реализаций операции редукции.

Для численной иллюстрации предложенного авторами метода рассматривалась плосконапряженная пластина (рис. 3) с начальной толщиной h, подверженная коррозионному износу и нагруженная по части верхней кромки линейно распределённой нагрузкой $q(x)=q_0+q(l-x)$.

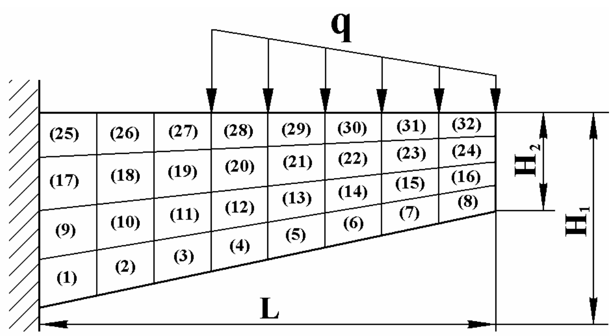

Рис. 3. Конечно-элементная модель пластины

Геометрические параметры конструкции, характеристики материала и параметры нагрузки и коррозионного износа следующие: L=160 см; H_1=80 см; H_2=40 см; h=2,0 см; $E=2{,}1 \cdot 10^5$ МПа; μ=0,3; $[\sigma]$=240 МПа; q_0=50 кг/см; q=30 кг/см^2; v_0=0,1 см/год; k=0,003 МПа$^{-1}$.

Погрешность вычисления функций ограничений принималась в диапазоне ε_{min}=0,01; ε_{max}=0,05.

В качестве варьируемых параметров принимались три группы конечных элементов: $\overline{x} = [x_1; x_2; x_3]^T$. Объединение КЭ в группы проводилось следующим образом (рис. 4):

– x_1: толщины КЭ с номерами 1–8, 10–16, 18–24;

– x_2: толщины КЭ с номерами 1, 9, 17;

– x_3: толщины КЭ с номерами 25–32.

Некоторые результаты решения задачи приведены в табл. 1. Здесь показаны оптимальные значения толщин групп КЭ и соответствующее значение объёма материала в зависимости от заданного срока эксплуатации.

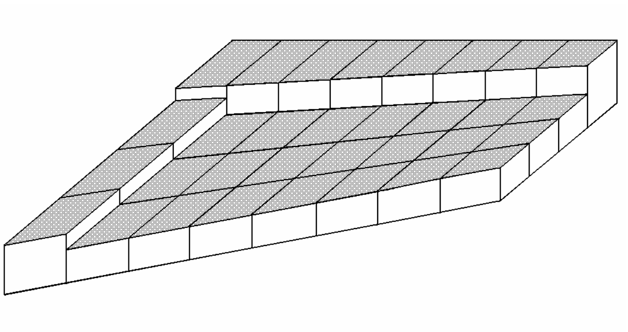

Рис. 4. Распределение материала в постановке оптимизационной задачи

Таблица 1

Результаты решения задачи оптимизации

t^*, лет	x_1, см	x_1, см	x_1, см	V, $см^3$
1,0	1,016	1,352	1,057	9153,565
2,0	1,092	1,200	1,143	9566,658
3,0	1,181	1,692	1,215	10746,827
4,0	1,240	1,788	1,405	11575,578
5,0	1,308	1,973	1,555	12464,593

Эффективность разработанного метода оценивалась количеством обращений к процедуре решения задачи метода конечных элементов в процессе поиска оптимального решения. В табл. 2 показаны результаты тестирования эффективности алгоритма. В строках таблицы приведены данные о количестве решений задачи МКЭ:

– при использовании для вычисления функции ограничений фиксированного шага, обеспечивающего погрешность, не превышающую ε_{min};

– при использовании нейросетевого модуля для определения шага на основании информации о текущих параметрах конструкции, параметрах агрессивной среды и допустимой погрешности ε_{min};

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

Таблица 2

Анализ эффективности алгоритма

Метод	Количество обращений к МКЭ
МДМ	5 507 219
НС+МДМ	2 714 230
МСД+НС+МДМ	719 446

В табл. 3 приведены результаты тестирования нейросетевого модуля управления погрешностью. В первом столбце таблицы показана требуемая точность вычисления ФО; во втором – длина шага интегрирования СДУ, полученная с помощью нейронной сети; в третьем – реальная погрешность решения СДУ для полученного параметра; в четвёртом – количество обращений к процедуре МКЭ при решении СДУ. Эталонное решение СДУ (значение долговечности конструкции $t^*=2{,}483$ года) было получено при последовательном уменьшении шага интегрирования и является асимптотически точным.

Таблица 3

Результаты тестирования алгоритма управления погрешностью

ε^*, %	h_t, лет	ε, %	N
1,0	0,0227	0,743	103
2,0	0,0532	1,886	48
3,0	0,0996	2,791	26
4,0	0,1553	3,769	17
5,0	0,2132	4,683	13

Выводы

Использование разработанного авторами нейросетевого алгоритма управления погрешностью вычислений функций ограничений позволило изменять параметры численного решения СДУ, моделирующей воздействие агрессивной среды, в процессе решения задачи оптимизации и предложить эффективный алгоритм её решения на основе метода скользящего допуска. Применение адаптированного МСД позволяет решать задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций в новой постановке, а именно, обеспечивающей получение решения с заданной точностью.

Полученные при проведении численных экспериментов результаты подтверждают правильность выбранного подхода.

Разработанный алгоритм адаптированного метода скользящего допуска обеспечивает решение задачи оптимизации корродирующих конструкций за меньшее время, чем традиционные методы нелинейного математического программирования. Это достигается за счёт снижения вычислительных затрат на начальных итерация решения задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зеленцов Д.Г.*, *Науменко Н.Ю.*, *Ляшенко О.А.* Информационное обеспечение расчётов корродирующих объектов. Конечно-элементное моделирование: монография. – Днепр: Баланс-Клуб, 2018. – 174 с.

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

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

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

7. *Радуль О.А.* Оптимальне проектування кородуючих конструкцій з використанням штучних нейронних мереж. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – К.: ТОВ «Укрінсталькон ім. В.Н. Шимановського», 2012. – № 1. – С.16-18.

8. *Alapati M.* Discrete Optimization of Truss Structure Using Genetic Algorithm // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. – 2014. – Vol.3. – № 1. – P.105-111.

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

Поступила в редакцию 24.04.2018

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ В МЕТОДАХ ОПТИМІЗАЦІЇ КОРОДУЮЧИХ ПЛОСКОНАПРУЖЕНИХ ПЛАСТИН

Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю.

Пропонується адаптація методу ковзного допуску стосовно до задач оптимального проектування кородуючих плосконапружених пластин при обмеженні з заданої довговічності (часу роботи до моменту вичерпання несучої здатності). Розглядається загальний випадок корозійної взаємодії, коли механічні напруги інтенсифікують процес накопичення геометричних ушкоджень. Модель корозійного процесу деформування пластини включає в себе систему рівнянь механіки (плоскої задачі теорії пружності) і систему диференціальних рівнянь, що моделюють процес зміни товщини пластини за просторовими і часовим координатами. Праві частини диференціальних рівнянь містять функції механічних напружень, для обчислення яких використовується метод скінченних елементів. Похибка розв'язку задачі напружено-деформованого стану може бути зменшена до прийнятного значення, в тому числі, з використанням модифікованих скінченних елементів змінної товщини, при цьому вона не залежить від поточного значення вектора варійованих параметрів. Таким чином, точність обчислення функцій обмежень оптимізаційної задачі визначається, головним чином, точністю чисельного розв'язку системи диференційних рівнянь. При незмінному параметрі чисельного методу вона змінюється в залежності від варійованих параметрів, що не дозволяє отримати розв'язок оптимізаційної задачі з заданою точністю. Використання нейромережевого алгоритму дозволить визначити параметр чисельного розв'язку в залежності від допустимої похибки і поточного значення вектора варійованих параметрів на кожній ітерації розв'язання оптимізаційної задачі. Стратегія методу ковзного допуску дозволяє регулювати похибку обчислення функцій обмежень в процесі розвязання задачі, що дозволяє забезпечити задану точність розв'язку при мінімальних обчислювальних витратах. Для ілюстрації методу розв'язано задачу вагової оптимізації плосконапруженої пластини. Наводяться результати чисельних експериментів, які підтверджують ефективність і точність запропонованого методу.

Ключові слова: оптимальне проектування, агресивне середовище, процес корозійного деформування, система диференціальних рівнянь, плосконапружені кородуючі пластини, метод ковзного допуску, штучна нейронна мережа.

USE OF NEURAL NETWORKS IN OPTIMIZATION METHODS FOR CORRODING PLANE STRESSED PLATES

Zelentsov D.G., Naumenko N.Yu.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The adaptation of the flexible tolerance method to the problems of optimal design of corroding plane stressed plates is proposed with a limitation on the given durability (the operating time up to the moment of exhaustion of bearing capacity). The general case of corrosion interaction is considered when mechanical stresses intensify the process of accumulation of geometric damages. The corrosion process model of plate deformation includes a system of equations of mechanics (plane problem of elasticity theory) and system of differential equations that models the process of changing plate thickness with respect to spatial and temporal coordinates. The right-hand sides of the differential equations contain functions of mechanical stresses, for the calculation of which the finite element method is used. The error in solution of stress-strain state problem can be reduced to an acceptable value, including using modified finite elements of variable thickness, while it does not depend on the current value of the vector of variable parameters. Thus, the accuracy of constraint function calculation for the optimization problem is determined mainly by the accuracy of the numerical solution of the system of differential equations. When the parameter of the numerical method is unchanged, an error varies depending on the variable parameters, which makes it impossible to obtain the solution of the optimization problem with a given accuracy. The use of the neural network algorithm will allow determining the parameter of the numerical solution depending on the permissible error and the current value of the variable parameters vector at each iteration of optimization problem solution. The strategy of flexible tolerance method allows to adjust the error in calculation of constraint functions in the process of problem solution, which allows to ensure the given accuracy of solution with minimal computational costs. To illustrate the method, the problem of the weight optimization of a plane stressed plate is solved. The results of numerical experiments confirming the efficiency and accuracy of the suggested method are presented.

Keywords: optimal design, aggressive medium, process of corrosion deformation, system of differential equations, plane stressed corroding plates, flexible tolerance method, artificial neural network.

REFERENCES

1. Zelentsov D.G., Naumenko N.Yu., Liashenko O.A. *Informatsionnoye obespecheniye raschetov korrodiruyushchikh obyektov. Konechno-elementnoye modelirovaniye* [Information support for the calculation of corrosive objects. Finite Element Modeling]. Dnepr: Balans-Klub, 2018. 174 p. *(in Russian).*

2. Korotchenko A.T. O primenenii metoda dinamicheskogo programmirovanija k optimalnomu integrirovaniju sistemy differencialnyh uravnenij [On the application of the method of dynamic programming 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).*

3. Zelentsov D.G., Liashenko O.A., Naumenko N.Yu. *Informatsionnoye obespecheniye raschetov korrodiruyushchikh obyektov. Matematicheskiye modeli i kontseptsiya proyektirovaniya sistem* [Information support for the calculation of corrosive objects. Mathematical models and the concept of system design]. Dnepropetrovsk: Ukrainian State University of Chemical Technology Publ., 2012, 264 p. *(in Russian).*

4. Korotkaja L.I. Ispolzovanie nejronnyh setej pri chislennom reshenii nekotoryh sistem differencialnyh uravnenij [The use of neural networks in the numerical solution of certain systems of differential equations]. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij.* [Eastern European Journal of Advanced Technology], 2011, № 3/4 (51), pp.24-27. *(in Russian).*

5. Denysiuk O.R. Opredelenie racionalnyh parametrov chislennogo reshenija sistem differencial'nyh uravnenij [Determination of rational parameters of the numerical solution of systems of differential equations]. *Vestnik Hersonskogo nacional'nogo tehnicheskogo universiteta.* [Bulletin of the Kherson National Technical University], 2016, № 3 (58), pp.208-212. *(in Russian).*

6. Zelencov D.G., Filatov G.V. Obzor issledovanij po primeneniju metodov nelinejnogo matematicheskogo programmirovanija k optimal'nomu proektirovaniju konstrukcij, vzaimodejstvujushhih s agressivnoj sredoj [A review of research on the application of methods of nonlinear mathematical programming to the optimal design of structures interacting with an aggressive medium]. *Voprosy himii i himicheskoj tehnologii.* [Questions of chemistry and chemical technology], 2002, № 4, pp.108-115. *(in Russian).*

7. Radul O.A. Optimalne proektuvannja korodujuchih konstrukcij z vikoristannjam shtuchnih nejronnih merezh [Optimal design of corrosion structures using artificial neural networks]. *Promislove budivnictvo ta inzhenerni sporudi.* [Industrial construction and engineering structures], 2012, № 1, pp.16-18. *(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, No. 1, pp.105-111.

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