

- произвести несколько замеров максимальных вибраций с интервалом времени 50 с.

**Выводы.** 1. Реконструкция фундамента дымососа после аварии проведена качественно, фундамент является цельным массивом.

2. Колебания фундамента имеют характер биений с периодом около 50 с, наложенных на обратные вибрации дымососа.

3. Зафиксированная «нестабильность» вибраций фундамента и дымососа («плавающая вибрация») объясняется недостатками используемых на предприятии измерительных устройств.

4. Вибрации дымососа являются стабильными, а их величина не превышает допускаемые нормативами. Следовательно, какие-либо работы по реконструкции фундамента и дымососа производить не нужно.

5. Сформулированы рекомендации по изменению методики замера вибраций дымососа имеющимися на предприятии приборами.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшуллер Г. С., Злотин Б. Л., Зусман А. В., Филатов В. И. Поиск новых идей: от озарения к технологии (Теория и практика решения изобретательских задач). – Кишинёв : Карта молдавеныскэ, 1989. – 381 с.

2. Куцевич В. Л. Психология и диалектика творчества. Методы решения творческих задач (теоретические основы эвристики): учеб.-метод. пособ. / Под общ. ред. к. т. н. Г. Н. Сердюк. – К. : ЗАО «Институт интеллектуальной собственности и права», 2000. – 204 с.

3. Основы научных исследований: учебн. для техн. Вузов / В. И. Крутов, И. М. Грушко, В. В. Попов и др. // Под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М.: Высш. шк., 1989. – 400 с.

4. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. – М. : Машиностроение, 1967. – 314 с.

5. Фейгельсон Н. Б. ТРИЗ и законы Мэрфи. – Журнал ТРИЗ / Педагогика, 1991. – № 2.2. – С. 81 – 83.

УДК 624.042:519.62

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДВУХ СХЕМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ БАЛОК

А. А. Радуль, \* асп.

\* ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»

**Ключевые слова:** оптимальное проектирование конструкций, коррозионный износ, коэффициент влияния периметра, схемы поиска оптимального проекта, нейронные сети

**Введение.** Общепринятая схема оптимального проектирования корродирующих конструкций является очень затратной [1]. Это значит, что без потери точности её применение возможно лишь для относительно простых конструкций. Поэтому представляет несомненный интерес переход к альтернативным схемам решения задачи оптимизации, позволяющим за приемлемый отрезок времени находить оптимальный проект и для достаточно сложных конструкций [2; 6].

**Анализ публикаций.** Обобщённая постановка задачи минимизации веса корродирующей балки в начальный момент времени для случая чистого изгиба может быть записана в следующем виде:

$$\begin{cases} A(\bar{x}) \rightarrow \min \\ [\sigma] - \frac{M_{\max}^y}{I(\bar{x}, t^*)} \geq 0. \\ x_i^- \leq x_i \leq x_i^+ \end{cases} \quad (1)$$

Для решения оптимизационной задачи (1) в большинстве известных работ [3] используется двухконтурная схема (далее – схема 1), показанная на рисунке 1, а. Эта схема неудобна по нескольким причинам [4; 6]. Второй контур, который учитывает влияние напряжений на скорость коррозионного процесса, приводит к значительному увеличению количества итераций, так как в нем численно решается задача Коши на каждом шаге при вычислении

функции ограничений. Кроме того, увеличивается погрешность решения задачи оптимизации, а при расчете статически неопределимых систем, когда в функции ограничений необходимо численно решать систему уравнений метода конечных элементов, контроль погрешности становится весьма затруднительным.

С другой стороны, известна альтернативная схема решения задачи оптимизации [7] (схема 2), показанная на рисунке 1, б. Во второй схеме решение задачи Коши осуществляется только один раз при пересчете оптимальных параметров конструкции в соответствии со степенью агрессивности среды, что значительно повышает ее эффективность. Более того, разделение контуров решения задачи математического программирования и моделирования коррозионного процесса позволяет контролировать погрешности численных процедур в каждом из них и повышать точность получаемых решений [6].

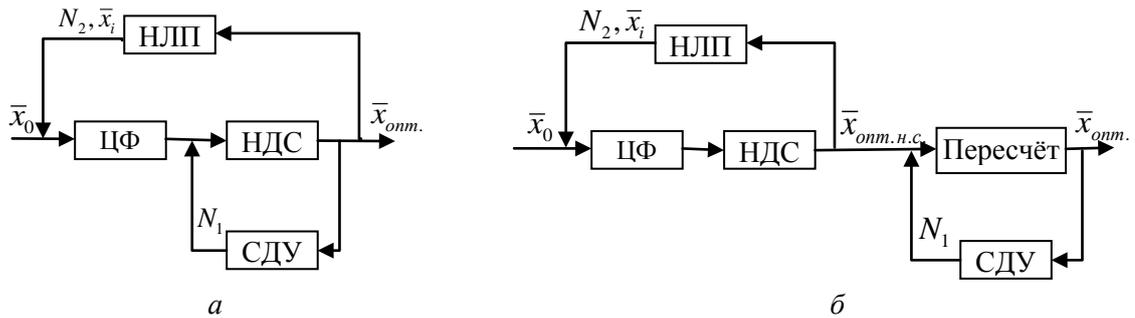


Рис. 1. а – двухконтурная схема (схема 1); б – схема с последовательными одноконтурными связями (схема 2):

ЦФ – модуль вычисления целевой функции; НДС – модуль вычисления функции ограничений; НЛП – модуль решения задачи нелинейного программирования; СДУ – модуль пересчёта геометрических параметров (задача Коши);  $x_0$  – вектор входных параметров (параметры конструкции, агрессивность среды, срок эксплуатации);  $x_{opt}$  – вектор выходных параметров (оптимальные параметры конструкции); «Пересчёт» – модуль пересчёта оптимальных параметров

Несмотря на несомненные преимущества такой постановки, её практическое применение в настоящее время представляется возможным лишь для некоторых классов конструкций. Это вызвано тем, что на долговечность корродирующих конструкций значительное влияние оказывает периметр сечения [4].

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда возможно использование схемы 2. Очевидно, что при одинаковом моменте сопротивления долговечность балки будет тем выше, чем меньше периметр её сечения. В схеме 1 влияние периметра учитывается при моделировании коррозионного процесса. Но в схеме 2 оптимальный проект находится для нейтральной среды и при проверке ограничений коррозионный процесс не моделируется. Для учёта влияния периметра сечения в работе [4] предложено включить периметр в целевую функцию:

$$\begin{cases} \omega \cdot P + (1 - \omega) \cdot A \rightarrow \min; \omega(0;1) \\ \left[ \sigma \right] - \frac{M_{\max}^y}{I(\bar{x}, t^*)} \geq 0 \\ x_i^- \leq x_i \leq x_i^+ \end{cases}, \quad (2)$$

где  $x_{opt. н.с.}$  – вектор оптимальных параметров для нейтральной среды;

$\omega$  – весовой коэффициент;

$P$  – периметр сечения;

$A$  – площадь сечения.

Оптимальные проекты, полученные по схеме 1 и схеме 2, будут совпадать лишь при правильном выборе коэффициента влияния периметра  $\omega \in (0;1)$ . Таким образом, для использования схемы 2 возникает проблема идентификации модели (2) по параметру, а именно по коэффициенту влияния периметра  $\omega$ . В работах [4; 6] были предложены эмпирические формулы для нахождения коэффициента влияния периметра, однако они не учитывают того, что этот коэффициент зависит сразу от нескольких факторов и, поскольку эта зависимость

невная, её весьма сложно описать в виде какой-либо формулы.

**Цель статьи.** Путём настройки и обучения искусственной нейронной сети создать простую и, в то же время, точную аппроксимационную модель определения коэффициента влияния периметра сечения.

**Материалы и методы.** Автором получено аналитическое решение задачи оптимизации для нейтральной среды в постановке (2) для балки прямоугольного сечения (материал – сталь ВСтЗпс6-1) в условиях чистого изгиба [6]. Это позволило выявить все факторы, влияющие на выбор весового коэффициента, и обоснованно предложить способ его определения. Был проведён анализ влияния начальной скорости коррозии, допустимых напряжений и коэффициента влияния напряжений на выбор значения коэффициента влияния периметра. Для этого определялось значение коэффициента влияния периметра для различных значений одного параметра задачи (например, скорости коррозии), при этом остальные параметры оставались неизменными. Установлено, что при увеличении скорости коррозии от 0,01 до 0,7 см/год весовой коэффициент увеличивается с 0,05 до 0,55, а при дальнейшем увеличении скорости коррозии практически не изменяется. Увеличение коэффициента влияния коррозии имеет тот же характер, что и скорости коррозии – происходит увеличение коэффициента влияния периметра. Увеличение же допустимого напряжения, напротив, приводит к некоторому уменьшению значения коэффициента влияния периметра. Следует отметить, что при решении задачи использовалась модель эквивалентного сечения (рис. 3), когда для адекватного сравнения данных прокорродировавшее сечение в форме шестигранника заменяется прямоугольным с тем же моментом инерции [5].

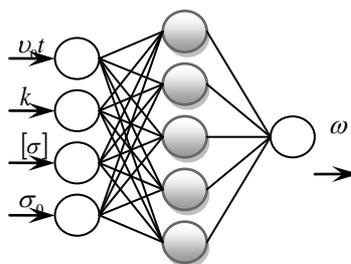


Рис. 2. Архитектура нейронной сети

Из постановки задачи следует выбор типа нейронной сети – сеть прямого распространения сигнала (рис. 2). Для данной задачи, как следует из теоремы о полноте [8], достаточно одного внутреннего слоя нейронов. Число нейронов во входящем и выходящем слое соответствует количеству входных и выходных параметров сети. Ввиду нелинейности задачи, в качестве функции активации была выбрана логистическая функция. Число нейронов во внутреннем слое подбиралось экспериментально в ходе обучения сети таким образом, чтобы с одной стороны обеспечить достаточное число внутренних связей для выделения зависимостей высокого порядка, с другой – не допустить паралича сети, когда не происходит обобщения, а сеть лишь запоминает обучающие образцы.

Определяющим фактором успешного обучения сети является полнота и репрезентативность обучающей выборки, это означает, что она должна адекватно и в полном объёме отражать реальные зависимости между входными и выходными параметрами решаемой задачи. Для получения обучающих образцов были заданы границы изменения варьируемых параметров в виде  $x_i \in [x_i^-, x_i^+]$ . Затем из этих границ случайным образом (по закону равномерного распределения) генерировались входные параметры нейронной сети – скорость коррозии, коэффициент влияния напряжений и допускаемые напряжения. Для сгенерированных параметров решалась задача оптимизации по схеме 1 – получение эталонного значения ширины и высоты сечения балки. Затем для тех же параметров решалась задача по схеме 2 при различных значениях коэффициента влияния периметра. Как показано в [4], в определённом диапазоне изменения коэффициента влияния периметра наблюдается седловая точка, это и есть значение коэффициента влияния периметра, при котором решение, полученное по схеме 2, совпадает с эталонным решением (схема 1). Значение коэффициента влияния периметра в седловой точке уточняли методом парабол, используя координаты двух соседних точек. Таким образом, каждый обучающий образец представляет собой параметры задачи (скорость коррозии, коэффициент влияния напряжений, допускаемые напряжения) и

желаемый для этих параметров выход сети (коэффициент влияния периметра). Образцы для тестирования получали таким же образом, как и обучающие образцы.

Количество образцов выбиралось в зависимости от количества внутренних связей в сети и желаемой точности обучения в соответствии с рекомендациями, приведенными в [9].

Перед обучением весовые коэффициенты сети генерируются случайным образом из некоторого диапазона небольших чисел [9]. На вход сети подаются входящие параметры первого образца, сеть вычисляет выходное значение. Это значение сравнивается с эталоном, вычисляется значение погрешности. На основе значения погрешности производится корректировка весов связей между нейронами по алгоритму обратного распространения ошибки [9]. Затем на вход сети подается следующий образец и снова производится корректировка весов в зависимости от ошибки выхода сети. После того, как на вход сети подаются все образцы, завершается первая эпоха обучения. На этом этапе вычисляется среднеквадратическое отклонение фактического выхода сети от желаемого. На вход сети подаются тестовые образцы (образцы, которые никогда не используются для обучения) и тоже вычисляется среднеквадратическое отклонение фактического выхода от желаемого. По соотношению среднеквадратического отклонения на учебных и тестовых образцах судят об успешности обучения сети. Сеть считается обученной, если и на учебных, и на тестовых образцах погрешность выхода сети не превышает заданную. Эпохи обучения сети повторяют до тех пор, пока сеть не будет обучена. Если погрешность на учебных образцах снижается, а на тестовых нет, то это означает, что сеть перестала обобщать данные и лишь запоминает обучающую выборку. В этом случае уменьшают норму обучения или меняют число нейронов в сети. Приемлемой погрешностью выхода сети считается погрешность в пределах 1 – 4 % относительно эталона.

Следует отметить, что все данные, которые поступают на вход сети, масштабируются на интервал  $(0;1)$  по формуле  $x_i = x_i^- + \alpha(x_i^+ - x_i^-); \alpha \in (0;1)$ . Так же производится обратное масштабирование выхода сети:

$$y_i = \left( \frac{x_i - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \right), \quad y_i \in (0;1).$$

**Результаты и их обсуждение.** В результате тестирования обученной сети для различных входных параметров были получены решения задачи оптимизации корродирующей балки прямоугольного сечения для случая чистого изгиба (рис. 4). В качестве критерия оценки достоверности полученных решений было принято отклонение значения коэффициента влияния периметра от его эталонного значения. Результаты тестирования (табл. 1) показали, что значения коэффициента влияния периметра, полученные с помощью сети, отличаются от эталонных значений не более чем на 1,5 %. Это отклонение объясняется погрешностью самой нейронной сети. Для сетей данного типа погрешность в пределах 1 – 4 % считается хорошим результатом, поэтому процесс обучения сети можно считать успешным.

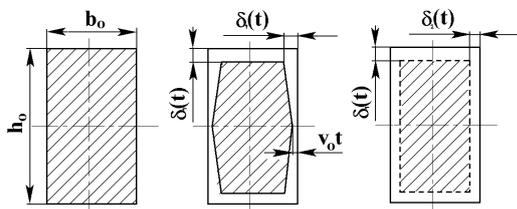


Рис. 3. Модель эквивалентного сечения

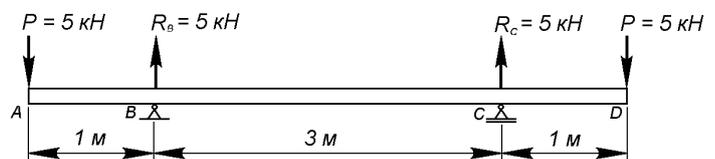


Рис. 4. Расчётная схема балки

Кроме того, осуществлялось сравнение нейросетевой методики получения значения коэффициента влияния периметра с методиками, предложенными в других работах. Для этого было найдено значение этого коэффициента с помощью эмпирических формулы, предложенных в работе [4]:

$$\omega = 1 - \frac{b(R)}{v_0 t + b(R)}; \quad (3)$$

и в работе [6]

$$\omega = -0,3(v_0 t)^2 + 0,77v_0 t + 0,03. \quad (4)$$

Значения коэффициента влияния периметра, полученные по различным методикам, и их отклонения от эталона

$v_0 t$	$\omega_{\text{эталон}}$	$\omega(3)$	$\omega(4)$	$\omega_{\text{ИНС}}$
0,1	0,112	0,107 (-4,9 %)	0,103 (-8,1 %)	0,110 (-1,4 %)
0,2	0,185	0,178 (-3,8 %)	0,181 (-2,2 %)	0,183 (-1,1 %)
0,3	0,248	0,246 (-1,0 %)	0,247 (-0,4 %)	0,249 (0,2 %)
0,4	0,299	0,292 (-2,5 %)	0,295 (-1,4 %)	0,300 (0,4 %)
0,5	0,341	0,322 (-5,6 %)	0,328 (-3,8 %)	0,345 (1,2 %)

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод о том, что значение коэффициента влияния периметра, полученное с помощью нейронной сети, является наиболее близким к эталонному. Это объясняется тем, что для обучения сети было использовано аналитическое решение задачи оптимизации по схеме 2. Кроме того сеть обучалась на достаточно большой выборке учебных образцов, равномерно распределённых в пространстве изменения варьируемых параметров. Меньший по сравнению с эмпирическими формулами разброс значений погрешности достигнут благодаря способности сети к обобщению данных.

**Выводы.** 1. При переходе к альтернативной схеме решения задачи определяющим фактором, с точки зрения достоверности получаемых решений, является выбор коэффициента влияния периметра, что свидетельствует о неоспоримой важности его быстрого и правильного определения.

2. Существующие методики получения значения коэффициента влияния периметра, основанные на эмпирических формулах, позволяют получить точное решение лишь в некоторой окрестности варьируемых параметров, для которых они получены.

3. Предложенная нейросетевая методика получения значения коэффициента влияния периметра позволяет достаточно точно определить его значение в максимально широких пределах изменения варьируемых параметров.

4. Предложенная методика получения обучающих образцов, основанная на использовании аналитического решения задачи долговечности, позволяет обучить сеть с минимальной погрешностью.

5. Анализ результатов сравнения предложенной нейросетевой методики и методик, предложенных в других работах, позволил сделать вывод о целесообразности использования именно нейросетевого подхода к идентификации схемы оптимизации корродирующих конструкций с двумя последовательными одноконтурными связями.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Василенко О. Г.** Дослідження ефективності алгоритмів розв'язування задач оптимізації конструкцій з урахуванням впливу агресивного середовища / О. Г. Василенко, А. П. Дзюба // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. мех. – 2009. – Вип. 13, т. 2. – С. 18 – 28.

2. **Дзюба А. П.** Про один підхід до розв'язання задач оптимізації елементів конструкцій з урахуванням спільної дії силових навантажень та агресивного середовища [Текст] / А. П. Дзюба, О. Г. Василенко, О. А. Дзюба // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Д. : Вид-во «Наука і освіта», 2007. – Вип. 8. – С. 55 – 67.

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

4. **Зеленцов Д. Г.** Исследование влияния периметра на оптимальные параметры сечений корродирующих изгибаемых стержневых элементов / Д. Г. Зеленцов, Т. Ю. Ускова // Вопр. химии и химич. технологии. – 2004. – № 6. – С. 119 – 122.

5. **Зеленцов Д. Г.** Расчёт конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы / Д. Г. Зеленцов. – Д. : УГХТУ, 2002. – 168 с.

6. **Зеленцов Д. Г.** Уточнение модели с двумя последовательными одноконтурными связями при решении задачи весовой оптимизации корродирующих балок / Д. Г. Зеленцов, А. А. Радуль // Системні технології. Регіон. міжвуз. збір.наук. пр. – Вип. 4 (63). – Д., 2009. – С. 99 – 106.

7. Почтман Ю. М. Исследование напряженно-деформированного состояния и оптимальное проектирование балок-стенок, подверженных воздействию агрессивных сред / Ю. М. Почтман, Д. Г. Зеленцов // Численные методы решения задач строительной механики, теории упругости и пластичности. – Волгоград, 1990. – С. 154 – 155.

8. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд. / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2002. – 382 с.

9. Haykin S. S. Neural networks: a comprehensive foundation / S. S. Haykin. – City: Prentice Hall, 1999. – 1140 p.

УДК 621.873

## ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОПОРНО-ПОВОРОТНИХ КРУГІВ НА БЕЗПЕКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ

*М. П. Колісник, к. т. н., проф., Г. В. Заяць, к. т. н., доц., А. Ф. Шевченко, к. т. н., доц.*

**Ключові слова:** безпека експлуатації, вантажопідйомний кран, опорно-поворотний круг, осьовий зазор, конструктивний параметр

**Постановка проблеми.** Майже всі поворотні вантажопідйомні крани оснащені опорно-поворотними пристроями з опорно-поворотними кругами (ОПК). Самі ОПК – металоємні вузли високої складності і відносно високої вартості.

Слід відзначити, що, за даними експлуатаційних організацій і нашого дослідження, дефекти ОПК в загальному обсязі дефектів несучих елементів кранів складають понад 10 % при істотній їх відносній вагомості. Від стану ОПК залежить безпека експлуатації, надійність і довговічність кранів у цілому.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Аналіз досліджень [6 – 8] і методичних розробок [4; 5] дозволив зробити висновок про необхідність загальної систематизації факторів і визначення основних дефектів ОПК, що впливають на безпеку експлуатації вантажопідйомних кранів.

**Метою** дослідження є визначення впливу стану опорно-поворотних кругів на загальну безпеку експлуатації вантажопідйомних кранів.

**Виклад основного матеріалу.** У будівельному виробництві широко використовують будівельні повноповоротні крани різних конструкцій, на частку яких припадає до 98 % усіх підйомно-транспортних робіт при подачі і монтажі будівельних елементів.

Так, за даними Держгірпромнагляду України [1; 2], на початок 2010 року в Україні в експлуатації перебувало понад 55 000 поворотних кранів, у тому числі баштових кранів 5 400 од., з числа яких майже 85 % мали відпрацьовані встановлені строки служби і, як вважається, мали граничний стан технічних параметрів.

Оновлення парку, наприклад, баштових кранів у короткі терміни неможливе у зв'язку з тим, що кранобудівні заводи України практично їх не виготовляють. Закупівля кранів відомих зарубіжних виробників являє певні фінансові труднощі. Експлуатація баштових кранів китайського виробництва виявила ряд конструктивних недоробок і пов'язаних із цим простоїв та загроз небезпеки експлуатації.

Тому баштовим кранам виконуються капітальні ремонти в умовах спеціалізованих ремонтних підприємств для забезпечення відповідності їх технічних параметрів вимогам нормативних документів [3 – 5].

Одним з основних базових вузлів баштових кранів, як і інших поворотних кранів, є опорно-поворотний круг (ОПК), який являє собою великогабаритний (діаметром 800 мм і більше) підшипник із кульковими або роликівими тілами кочення (рис. 1), чи комбіновані, які розташовані між двома кільцями з біговими доріжками кочення і є проміжним вузлом між поворотною і неповотною частинами крана. Знайомі також інші конструкції аналогічних опорно-поворотних кругів, наприклад комбіновані [6]. Особливості технології виготовлення, різновиди конструкції ОПК дозволяють виділити їх в окрему групу агрегатів, яка вимагає певних умов експлуатації, діагностування, технічного обслуговування і ремонту з відновленням їх технічних параметрів, а саме: точності обробки доріжок кочення кілець, паралельності і перпендикулярності поверхонь, строгого дотримання методів контролю, визначення і регулювання осьового зазору та інше.

Ефективність безпечного використання вантажопідйомних баштових кранів з кульковими