

## АНОТАЦІЯ

Бричковський О.Д. Керовані за точністю методи розв'язання систем диференціальних рівнянь в задачах оптимізації кородуючих конструкцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». – Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, Український державний університет науки і технологій навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2024.

**Метою роботи** є підвищення ефективності розв'язання задач оптимального проектування шарнірно-стержневих конструкцій (ШСК), призначених для експлуатації в агресивних технологічних середовищах, зокрема, вдосконалення методу поправних функцій і забезпечення його керованості за точністю.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

– Отримав подальший розвиток метод поправних функцій для розв'язання задачі довговічності кородуючих конструкцій, який на відміну від існуючого, є керованим за точністю і забезпечує більш точні розв'язки.

– Вперше запропоновано метод визначення значущих факторів в задачі довговічності кородуючих конструкцій на основі оптимізованої методом Optimal Brain Surgeon штучної нейронної мережі (ШНМ).

**В першому розділі** розглянуто задачу оптимального проектування кородуючої ШСК та визначено основні проблеми, пов'язані з її розв'язанням, такі як дискретна постановка задачі та необхідність моделювання впливу агресивного середовища на конструкцію при обчисленні функції обмежень. Розглянуто ключові моделі, які відрізняють постановку задачі для умов агресивного середовища від класичної: модель накопичення геометричних

пошкоджень конструкції у вигляді системи диференціальних рівнянь (СДР) і модель кородуючого перерізу елемента конструкції. Встановлено, що підвищення ефективності розв'язання за рахунок методів оптимізації не є можливим, проте можливе поліпшення ефективності на етапі обчислення функції обмежень, зокрема, розв'язання задачі довговічності кородуючої конструкції (ЗДКК). Проведено огляд існуючих методів розв'язання ЗДКК, зокрема, наведено основні відомості про методи, проведено аналіз їх переваг і недоліків, а також наявності їх керованості за точністю. Обґрунтовано вибір методу поправних функцій для розв'язання ЗДКК, як основи дисертаційного дослідження.

**В другому розділі** досліджено метод поправних функцій для розв'язання ЗДКК. Визначено вигляд поправної функції та методи її побудови за допомогою апроксимації. Наведено архітектуру ШНМ та основні властивості ШНМ, яка використовується для апроксимації поправної функції. Визначено, що для різних типів навантаження та перерізів стержнів потрібні окремі ШНМ.

Проведено аналіз впливу степеня поліному на точність апроксимації залежності осьових зусиль від часу. Проведений аналіз показав достатність поліному третього степеня для задовільної точності розв'язання ЗДКК.

Запропоновано використання методу Optymal Brain Surgeon (OBS) для обґрунтованого вибору значущих параметрів ШНМ. Застосування методу OBS дозволило зменшити кількість вхідних параметрів ШНМ без суттєвої втрати точності, при цьому, кількість нейронів ШНМ була зменшена майже втричі.

Описано спосіб генерації вибірки для навчання ШНМ, включно із етапами отримання еталонного і наближеного чисельних розв'язків для обчислення значень поправної функції

**В третьому розділі** представлена модифікація методу поправних функцій для розв'язання ЗДКК, яка уточнює оригінальний метод. Для уточнення оригінального методу розглядалися альтернативні набори вхідних

даних для ШНМ, які дозволяють збільшити інформацію про зміну осьових зусиль у часі. За результатами проведених експериментів, запропоноване уточнення показало зменшення похибки, в залежності від розглядуваного випадку, в середньому на 43.5% і 9.6% порівняно з оригінальним методом. Відповідно запропонованій автором модифікації зникає необхідність в попередній апроксимації осьових зусиль перед застосуванням поправної функції, що позитивно впливає на обчислювальну складність методу. Для уточненого методу поправних функцій було встановлено керуваність за точністю методу шляхом визначення залежності математичного сподівання цільової метрики від параметрів чисельного розв'язку. Останнє дозволяє знаходити баланс між обчислювальною складністю методу і необхідною точністю розв'язку, що є особливо важливим при розв'язанні задач оптимального проектування конструкцій, які складаються із великої кількості елементів. При оцінці моделей, і на етапі уточнення методу, і на етапі встановлення керуваності за точністю методу, було враховано залежність вихідних значень ШНМ від випадкових початкових значень вагових коефіцієнтів, що підвищує достовірність отриманих результатів.

**В четвертому розділі** розв'язано практичну задачу оптимального проектування кородуючої ШСК із запропонованими автором модифікаціями поправних функцій. В якості модельної конструкції розглядалася статично-невизначена 15-стержнева ШСК, для якої задача розв'язувалась у двох постановках, що відрізнялися кількістю варійованих параметрів. Для розв'язання задачі використовувався генетичний алгоритм із застосуванням методу штрафних функцій. Порівняння з результатами інших авторів та інших підходів показало, що запропонована автором модифікація методу поправних функцій має найнижчу обчислювальну складність.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що результати проведених досліджень дозволяють мінімізувати обчислювальні витрати при розв'язанні задач оптимального проектування кородуючих ШСК із забезпеченням необхідної точності результату. Використання

модифікованого методу поправних функцій сумісно з методами еволюційного моделювання дозволить одержати розв'язки важливих прикладних задач, спрямованих на підвищення якості конструкторських рішень при проектуванні ШСК, що призначені для експлуатації в агресивних середовищах.

**Ключові слова:** оптимізація, штучна нейронна мережа, апроксимація, система диференціальних рівнянь, керованість за точністю, обчислювальна складність, генетичні алгоритми, оптимальне проектування, математичне та комп'ютерне моделювання, кородуюча конструкція.

## ABSTRACT

**Brychkovskiy O.D. Accuracy-controlled methods for solving systems of differential equations in optimization problems of corroding structures. – Qualifying scientific paper as a manuscript.**

Thesis for PhD degree on specialty 122 Computer Science. – State Higher Educational Institution «Ukrainian State University of Chemical Technology», Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, Ukrainian State University of Science and Technologies Educational–Scientific Institute «Ukrainian State University of Chemical Technology», Dnipro, 2024.

**The purpose of the work** is to improve the efficiency of solving optimal design problems for hinge-rod structures (HRS) intended for operation in aggressive technological environments, specifically by refining the correction function method and ensuring its accuracy control.

### **Scientific novelty of the obtained results:**

– The method of correction functions for solving the durability problem of corroding structures has been further developed, which, unlike the existing method, is accuracy-controlled and provides more precise solutions.

– For the first time, a method for determining significant factors in the durability problem of corroding structures based on an artificial neural network (ANN) optimized by the Optimal Brain Surgeon method has been proposed.

**The first chapter** examines the problem of optimal design of a corroding HRS and identifies the main issues associated with its solution, such as the discrete nature of the problem and the need to model the impact of the aggressive environment on the structure when calculating the constraint function. Key models are considered, distinguishing the problem statement for aggressive environments from classical ones: the model of geometric damage accumulation in the structure in the form of a system of differential equations (SDE) and the model of the corroding cross-section of a structural element. It is established that increasing the efficiency of the solution through optimization methods is not feasible; however,

improving efficiency at the stage of constraint function calculation, specifically solving the PDCS, is possible. A review of existing methods for solving PDCS is conducted, providing essential information about the methods, analyzing their advantages and disadvantages, and assessing their accuracy control. The choice of the correction function method for solving PDCS as the basis of the dissertation research is substantiated.

**The second chapter** explores the correction function method for solving CSD. The form of the correction function and methods for its construction through approximation are determined. The architecture of the ANN and the main properties of the ANN used for approximating the correction function are presented. It is established that separate HNMs are required for different types of loads and rod cross-sections. An analysis of the polynomial degree impact on the accuracy of approximating the axial force dependence on time is conducted. The analysis showed that a third-degree polynomial is sufficient for satisfactory accuracy in solving PDCS. The use of the Optimal Brain Surgeon (OBS) method for a justified selection of significant ANN parameters is proposed. Applying the OBS method reduced the number of ANN input parameters without significant loss of accuracy, with the number of ANN neurons decreased by nearly threefold. A method for generating a training sample for the ANN is described, including stages for obtaining reference and approximate numerical solutions for calculating correction function values.

In **the third chapter**, a modification of the correction function method for solving PDCS is presented, which refines the original method. To refine the original method, alternative sets of input data for the ANN were considered, allowing for increased information about the change in axial forces over time. Based on the results of the experiments conducted, the proposed refinement showed a reduction in error, depending on the case considered, by an average of 43.5% and 9.7% compared to the original method. According to the modification proposed by the author, the need for preliminary approximation of axial forces before applying the correction function is eliminated, which positively affects the

computational complexity of the method. For the refined correction function method, accuracy control of the method was established by determining the dependence of the mathematical expectation of the target metric on the parameters of the numerical solution. This allows finding a balance between the computational complexity of the method and the required accuracy of the solution, which is especially important when solving optimal design problems for structures consisting of a large number of elements. In evaluating the models, both at the refinement stage of the method and at the stage of establishing accuracy control, the dependence of the ANN output values on the random initial values of the weight coefficients was taken into account, which increases the reliability of the obtained results.

**The fourth chapter** solves the practical problem of optimal design for a corroding HRS with the author's proposed correction function modifications. A statically indeterminate 15-rod HRS was considered as the model structure, with the problem solved in two formulations differing in the number of varied parameters. The genetic algorithm with the penalty function method was applied to solve the problem. Comparison with other authors' results and other approaches showed that the author's proposed correction function method modification has the lowest computational complexity.

**Practical significance of the obtained results** lies in the fact that the conducted research results allow minimizing computational costs when solving optimal design problems of corroding HRS while ensuring the necessary result accuracy. The use of the modified correction function method combined with evolutionary modeling methods will enable solutions to important applied problems aimed at improving the quality of design decisions in designing HRS intended for operation in aggressive environments.

**Keywords:** optimization, artificial neural network, approximation, system of differential equations, accuracy control, computational complexity, genetic algorithms, optimal design, mathematical and computer modeling, corroding structure.