

6. Гаркунов Д.Н. Триботехника: [учебник для студентов вузов]. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение. – 1989. – 328 с.
7. Долговечность трущихся деталей / [под ред. Д. Н. Гаркунова]. – М.: Машиностроение. – 1986. – Вып. 1. – 264 с.
8. Справочник химика: Т.1 – [2-е изд.]. – Л. – М.: Госхимиздат, 1962. – 1071 с.
9. Плешивцев Н.В. Катодное распыление / Плешивцев Н.В. – М.: Атомиздат, 1968. – 339 с.
10. Пастух І.М. Дослідження зносостійкості при граничному терті азотованих металевих поверхонь / Пастух І.М., Лук'янюк М.В., Здибель О.С // Вісник ХНУ, Хмельницький, 2010, № 3. – С. 15-20.

Надійшла 15.11.2010 р.

УДК 519.832.3+004.032.26

В.В. РОМАНЮК  
Хмельницький національний університет

## ВИКОРИСТАННЯ МІНІМАКСНОГО ПРИНЦИПУ У ПРОГНОЗНОМУ КОНТРОЛІ КОРПУСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУРИ МІНІМІЗАЦІЇ ПОМИЛКИ

Пропонується антагоністична модель для оптимізації вибору процедури мінімізації помилки для нейромережевої моделі контролю. Показано, що відповідна гра розв'язується у чистих стратегіях, що значно спрощує реалізацію запропонованого мінімаксного принципу.

There is suggested an antagonistic model for optimizing the selection of the error minimization routine within neural net control model. It has been shown, that the corresponding game is solved in pure strategies, what simplifies the suggested minimax principle realization considerably.

Ключові слова: математична модель, імітаційна модель, динамічна модель, нейромережа, антагоністична гра, оптимальна стратегія, мінімаксний принцип, MATLAB Simulink®, блокова модель, процедура мінімізації помилки.

### Постановка й актуальність проблеми у загальному виді

Моделювання і прогнозування складних систем та об'єктів є безперечно важливим етапом перед їх введенням у дію або експлуатацію. Натурне моделювання тут зазвичай є практично неможливим, тому застосовують або виключно математичні моделі, або їх імплементацію у структурні блокові моделі. Одним з найкращих засобів для блокового моделювання є середовище MATLAB Simulink®, де містяться демонстраційні приклади для імітаційного моделювання декількох динамічних систем [1, 2] з можливістю [3] їх уточнення або добудовування. Серед цих динамічних блок-моделей є нейромережева система прогнозного контролю концентрації корпусного ядерного реактора (рис. 1 з файлу predcstr.mdl), у якій нейромережа використовує одну з п'яти наявних процедур мінімізації помилки (за умовчанням, процедура CSRCHBAC — One-dimensional minimization using backtracking for the NN Predictive Controller). Однак при увімкненні деяких інших процедур виявляються подекуди кращі результати, ніж дає процедура CSRCHBAC. Щоправда, ці результати залежать від часу імітації.

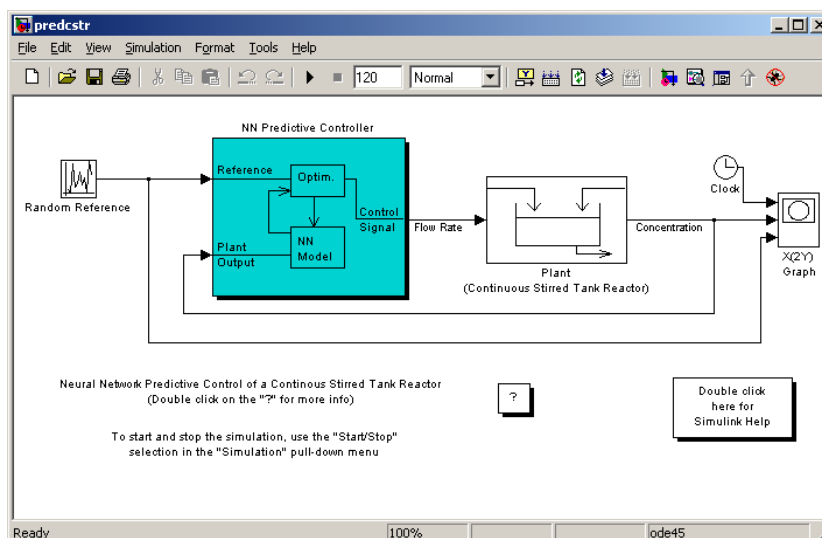


Рис. 1. Блок-модель нейромережевого прогнозного контролю концентрації корпусного ядерного реактора у MATLAB Simulink®

Аналіз останніх досліджень і публікацій за предметом дослідження та окреслення питання  
щодо неоднозначності вибору параметрів нейромереж

Нейромережі різної структури є надзвичайно вагомим елементом сучасних систем підтримки прийняття рішень та імітаційного моделювання. Формування, розробка і розвиток нейромереж у MATLAB Simulink<sup>®</sup> можна здійснювати за матеріалами і прикладами, що наводяться у [2, 3]. Фундаментом нейромережі, звичайно ж, є структура штучних нейронів та їх нашарування зі зв'язками, котре визначає архітектуру нейромережі [3]. У роботі [4] показано, що для більш гнучкого навчання нейромережі у ній можна використати декілька функцій активації одного типу нейрона, вибір яких здійснюватиметься за імовірностями в оптимальній стратегії другого гравця спеціальної антагоністичної гри. І взагалі, легко передбачити, що за подібним мінімаксімним принципом можна усунути неоднозначність [5, 6] вибору таких параметрів нейромережі, включаючи функцію активації нейрона, як зміщення, зважування перед процесом навчання, тип зв'язків між шарами, алгоритм мінімізації помилки у процесі навчання та його тривалість.

**Формулювання мети і постановка завдань статті**

Розглядатимемо динамічну блок-модель нейромережевої системи прогнозного контролю концентрації корпусного ядерного реактора (ПКККЯР) у MATLAB Simulink<sup>®</sup>. Покажемо, що для вибору процедури мінімізації помилки можна використати мінімаксімний підхід. Для цього необхідно побудувати відповідну антагоністичну гру, де чистими стратегіями другого гравця будуть п'ять наявних процедур мінімізації помилки. Множиною чистих стратегій першого гравця буде інтервал часу, протягом якого здійснюватиметься імітація. Оптимальна стратегія другого гравця у цій грі вкаже на, у щонайгіршому випадку, імовірнісний розподіл процедур мінімізації помилки. Якщо ж гра матиме розв'язок у чистих стратегіях, то оптимальний вибір процедури мінімізації помилки здійснюватиметься безімовірно саме за ним.

**Вибір оптимальної процедури мінімізації помилки за допомогою ігрової моделі**

Відкрита та доповнена блоками віднімання, взяття по модулю, інтегрування, збереження у файл та відображення блок-модель ПКККЯР зображена на рис. 2. Нехай  $c(t)$  є реальним рівнем концентрації у реакторі при часі  $t \in [0; 120]$  у секундах, де двохвилинний період є максимальним часом імітаційного моделювання. Прогнозований рівень концентрації обчислюється за однією з п'яти процедур мінімізації помилки, котрі можна перемикати (рис. 3):  $\tilde{c}_{CSRCHGOL}(t)$ ,  $\tilde{c}_{CSRCHBAC}(t)$ ,  $\tilde{c}_{CSRCHHYB}(t)$ ,  $\tilde{c}_{CSRCHBRE}(t)$ ,  $\tilde{c}_{CSRCHCHA}(t)$ . Окрім CSRCHBAC, відповідними процедурами є: CSRCHGOL — One-dimensional minimization using golden section search, CSRCHHYB — One-dimensional minimization using a hybrid bisection-cubic search, CSRCHBRE — One-dimensional interval location using Brent's method, CSRCHCHA — One-dimensional minimization using the method of Charalambous.

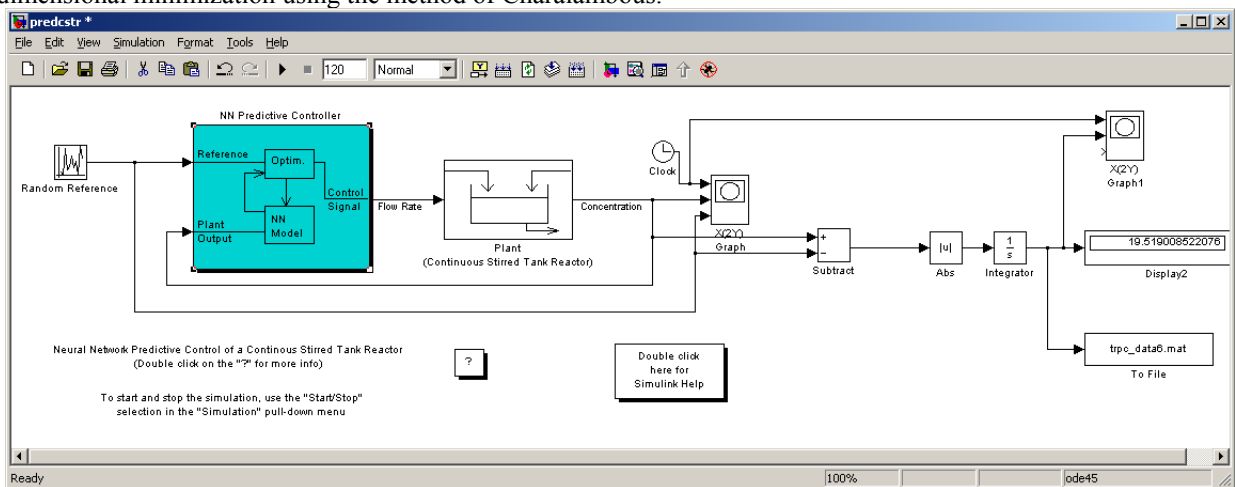


Рис. 2. Доповнена блок-модель ПКККЯР у MATLAB Simulink<sup>®</sup>

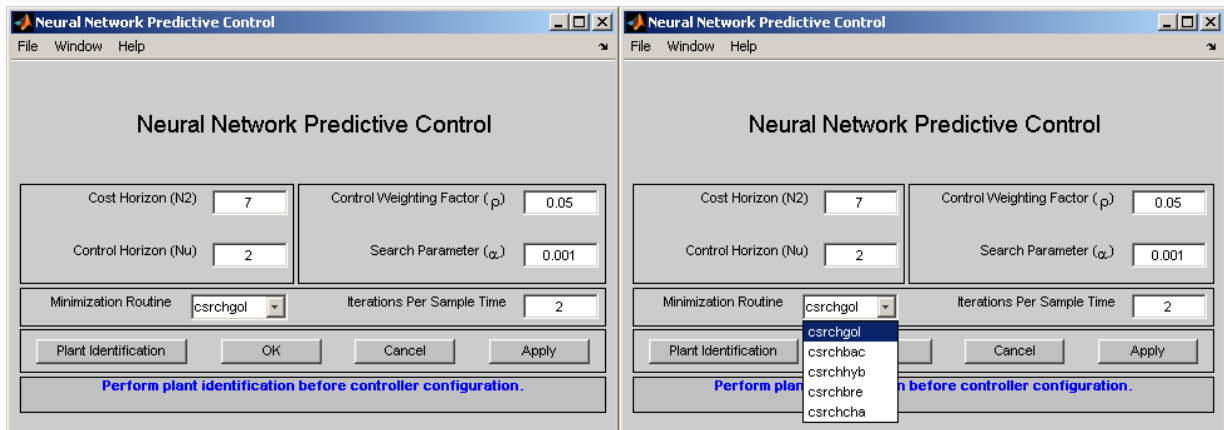


Рис. 3. Вікно для корекції параметрів нейромережі

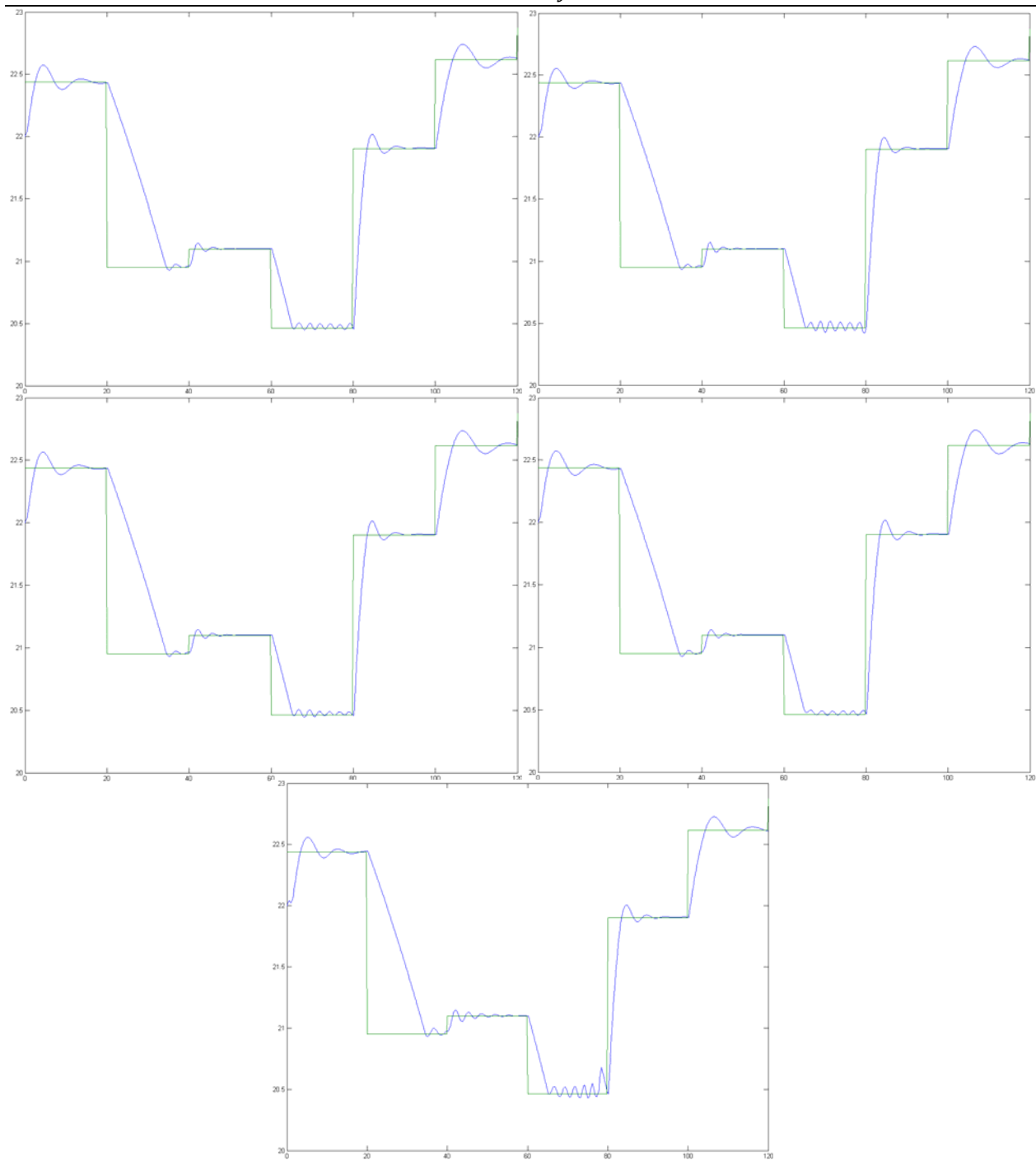


Рис. 4. Реальний та прогнозований рівні концентрації у реакторі за п'яти різних процедур мінімізації помилки

Запускаючи імітаційну модель на дві хвилини для кожної процедури мінімізації помилки, у кожен момент часу  $t \in [0; 120]$  за допомогою доповнених блоків обчислюватимемо (рис. 4 і 5)

$$d_{\text{CSRCHGOL}}(t) = \int_0^t |c(\xi) - \tilde{c}_{\text{CSRCHGOL}}(\xi)| d\xi, \quad (1)$$

$$d_{\text{CSRCHBAC}}(t) = \int_0^t |c(\xi) - \tilde{c}_{\text{CSRCHBAC}}(\xi)| d\xi, \quad (2)$$

$$d_{\text{CSRCHHYB}}(t) = \int_0^t |c(\xi) - \tilde{c}_{\text{CSRCHHYB}}(\xi)| d\xi, \quad (3)$$

$$d_{\text{CSRCHBRE}}(t) = \int_0^t |c(\xi) - \tilde{c}_{\text{CSRCHBRE}}(\xi)| d\xi, \quad (4)$$

$$d_{\text{CSRCHCHA}}(t) = \int_0^t |c(\xi) - \tilde{c}_{\text{CSRCHCHA}}(\xi)| d\xi. \quad (5)$$

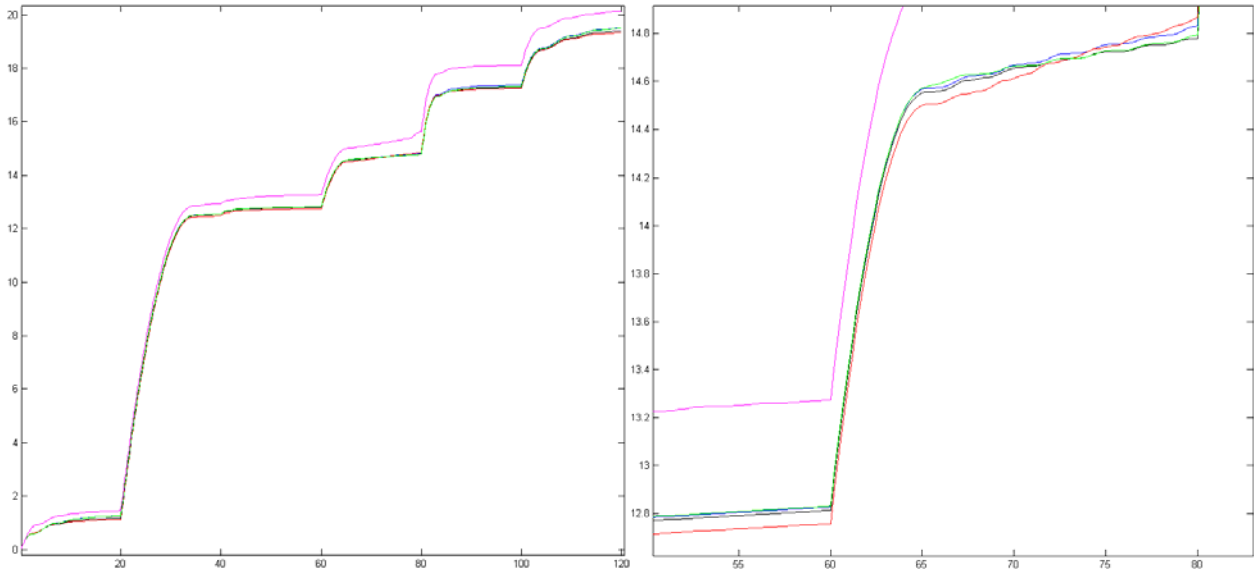


Рис. 5. Інтеграли (1) — (5) абсолютних різниць реальних та прогнозованих рівнів концентрацій у реакторі за п'ять різних процедур мінімізації помилки

Далі будемо нескінченну антагоністичну гру з ядром  $K(x, y; t)$  на множині  $X \times Y$ , де чиста стратегія першого гравця

$$x \in X = (0; t] \quad \text{при} \quad t \in (0; 120], \quad (6)$$

а чиста стратегія другого гравця

$$y \in Y = \{y_{\text{CSRCHGOL}}, y_{\text{CSRCHBAC}}, y_{\text{CSRCHHYB}}, y_{\text{CSRCHBRE}}, y_{\text{CSRCHCHA}}\}, \quad (7)$$

причому ядро  $\forall t \in (0; 120]$  визначається так:

$$K(x, y_{\text{CSRCHGOL}}; t) = d_{\text{CSRCHGOL}}(x), \quad (8)$$

$$K(x, y_{\text{CSRCHBAC}}; t) = d_{\text{CSRCHBAC}}(x), \quad (9)$$

$$K(x, y_{\text{CSRCHHYB}}; t) = d_{\text{CSRCHHYB}}(x), \quad (10)$$

$$K(x, y_{\text{CSRCHBRE}}; t) = d_{\text{CSRCHBRE}}(x), \quad (11)$$

$$K(x, y_{\text{CSRCHCHA}}; t) = d_{\text{CSRCHCHA}}(x). \quad (12)$$

Виявляється, що нескінченна антагоністична гра з ядром  $K(x, y; t)$  на множині  $X \times Y$  з (6) і (7) при (8) — (12) розв'язується у чистих стратегіях, причому для

$$X \in \{(0; t]\}_{t \in (0; 0.7)} \cup \{(0; t]\}_{t \in (5.5; 120)} \quad (13)$$

процедура мінімізації помилки CSRCHBAC справді виявляється найкращою. А ось для

$$X \in \{(0; t]\}_{t \in [0.7; 5.5]} \quad (14)$$

оптимальним є застосування процедури CSRCHHYB. Це говорить про те, що процедура CSRCHBAC за умовчанням вибрана вірно, але для тих випадків, коли час готовності реактора належить відрізку  $[0.7; 5.5]$ , слід вмикати процедуру CSRCHHYB.

#### Висновок та перспектива подальшого дослідження

Для імітаційного моделювання такого складного об'єкта як ядерний реактор невраховування навіть дрібниць є неприпустимим, тому принцип мінімаксу (найбільш обережний принцип) і був застосований. А продемонстрований приклад оптимізації процедури мінімізації помилки можна використати як шаблон при неоднозначностях у виборі й інших параметрів нейромереж. Лише треба коректно застосовувати найбільш обережний принцип, при якому дії першого гравця вважаються вкрай непередбачуваними. У перспективі можна продовжити дослідження щодо оптимізації інших параметрів нейромережі ПКККЯР у MATLAB Simulink®.

1. Дьяконов В. П. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб. : Питер, 2001. — 480 с. : ил.
2. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6®. Основы применения. Серия “Библиотека профессионала” / В. П. Дьяконов. — М. : СОЛОН-Пресс, 2005. — 800 с. : ил.
3. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М. : Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.
4. Romanuke V. V. Adjusting the neuron transfer function with symmetric kernel matrix game / V. V. Romanuke // V International Conference on Optoelectronic Information Technologies “Photonics — ODS 2010”, September 28 — 30, 2010, Vinnytsya : abstracts. — Vinnytsya : VNTU, 2010. — P. 61.
5. Романюк В. В. Мінімаксний підхід у реалізації стохастичного параметра з невідомим імовірнісним розподілом на інтервалі ненульової міри / В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2010. — № 3. — С. 65 — 71.
6. Романюк В. В. Оцінювання вірогідності розподілу статистичних частот випадкової величини з невідомим математичним сподіванням і дисперсією / В. В. Романюк // Вісник НТУ “ХПІ”. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. — Харків : НТУ “ХПІ”, 2010. — № 21. — С. 152 — 161.

Надійшла 2.11.2010 р.

УДК 620.19: 629.33

Ю.І. ШАЛАПКО, А.Л. ГАНЗЮК, М.А. РАЗУВАЄВА  
Хмельницький національний університет

## ПРИХОВАНІСТЬ ФРЕТТИНГ-ПРОЦЕСІВ У З’ЄДНАННЯХ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА БЕЗПЕКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Явище фретингу як одне з специфічних контактних видів взаємодії досліджується вже друге сторіччя. Найбільш інтенсивно це відбувається останні 20-30 років і пов’язано не стільки з проблемою зношування вузлів тертя, а з небезпекою раптового виходу з ладу номінально-нерухомих з’єднань. Експлуатація автомобільної техніки з точки зору надійності вузлів кріплення та фретинг-процесів відрізняється певними особливостями: нестационарністю динамічних навантажень та впливом агресивного середовища. Саме нестационарність навантаження призводить до раптового руйнування вузлів нерухомого спряження, а прихованість довготривалої дії від фретингу не дає можливості передбачити аварійну ситуацію.*

*The phenomenon of fretting, as one of the specific kinds of contact interaction study is the second century. The most intense is the case the last 20-30 years is due, not so much the problem of wear of friction units, and the danger of sudden failure of the nominally-fixed connections. Operation of vehicles in terms of reliability of components and fasteners fretting process is different specific features: dynamic loads and nonstationary environments. This nonstationary loading leads to sudden destruction of real coupling units and long-term action of secrecy prevents fretting include emergency.*

Ключові слова: фретинг, надійність, номінально-нерухоме з’єднання.

### Вступ

Сучасний розвиток наукоємності техніки вимагає більш уважного ставлення до трибологічних проблем, пов’язаних з контактними мікропереміщеннями, які виникають у номінально-нерухомих з’єднаннях при динамічному та вібраційному навантаженні механічного вузла. Приклади пошкоджень від фретинг-корозії та фретинг-втоми зустрічаються у багатьох дослідженнях цієї трибологічної проблеми. Наведемо результати звіту державної комісії з розслідування найбільш масштабної за останні часи аварії Саяно-Шушенської ГЕС у 2009 році [1]. З акту технічного розслідування Ростехнадзору слідує, що під час перехідних гідродинамічних процесів, пульсації тиску у проточному тракті й підвищеної вібрації виникли втомні тріщини біля місць контактування деталей кріплення гідроагрегату, в тому числі кришки турбіни. Це викликало руйнування шпильок, зрив кришки турбіни й розгерметизацію водопідводного тракту гідроагрегату.

### Особливості сил тертя при вібраційному навантаженні нерухомих з’єднань

Розглянемо специфіку фретинг-процесів у малоамплітудній області відносних мікропереміщень. Саме амплітуда у 5-20 мкм практично не дає можливості об’єктивно оцінити передруйнівний стан з’єднання: відсутні стуки, удари, скрипіння, видиме розшатування, підвищена вібрація. В умовах малоамплітудного фретингу швидкість мікропроковзування є дуже малою, навіть за великих частот коливань. Так, при гармонічному законі коливань двох поверхонь з частотою 100 Гц й амплітудою відносних мікропереміщень 10 мкм максимальна швидкість проковзування дорівнює 3.14 мм/с. А для імпульсних коливань у формі трикутника швидкість з такою ж амплітудою буде 2 мм/с. Такі малі відносні швидкості разом з малими мікропереміщеннями мають принципові особливості, які впливають на загальну картину фретинг-процесів у номінально-нерухомому контакті. Для розуміння природи латентного (прихованого) фретингу, умов його ініціювання та подальшої еволюції контакту необхідно врахувати наступні ключові моменти: