

## ВІРТУАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС З ПАРАМЕТРИЧНИМ НАЛАГОДЖУВАННЯМ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

**О.П. Чорний\***, докт.техн.наук, **С.А. Сергієнко\*\***, канд.техн.наук  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
вул. Першотравнева, 20, Кременчук, 39600, Україна.  
E-mail: [alekseii.chornyi@gmail.com](mailto:alekseii.chornyi@gmail.com), [serhiv.serhivenko@gmail.com](mailto:serhiv.serhivenko@gmail.com)

*Представлено підхід до вирішення задачі параметричної ідентифікації електромеханічних перетворювачів постійного та змінного струму у динамічних режимах. Наведено експериментальні дослідження процесів ідентифікації параметрів двигунів постійного струму та асинхронного. Підтверджено ефективність розробленого алгоритму для налаштування на реальну електромеханічну систему віртуального комплексу, що дасть змогу вирішувати задачі дослідження і діагностики, які не завжди можна виконати на експериментальній установці; встановлення допустимості і уточнення меж застосування режимів роботи електромеханічної системи; оцінки експлуатаційного стану системи і її конструктивних елементів; дослідження причин аварій і пошкоджень її складових. Бібл. 5, табл. 1, рис. 3.*

**Ключові слова:** електромеханічна система, параметрична ідентифікація, віртуальний комплекс.

**Вступ.** Віртуальні лабораторні комплекси та віртуальні лабораторії впевнено зайняли важливе місце в навчальному процесі [1] як елементи дистанційного навчання, як засоби дослідження електромеханічних систем (ЕМС) шляхом їхнього математичного моделювання, а також як окремі дослідницькі комплекси, що поєднують реальне електромеханічне обладнання та його математичні моделі. Використання таких комплексів як елементів систем керування дає змогу забезпечити задані показники якості керування. Зазначений підхід знайшов широке застосування в системах керування з еталонною моделлю. Теорія таких систем отримала розвиток ще з 60-х років ХХ століття. Враховуючи, що математичний опис ЕМС приймався відомим, зусилля дослідників були спрямовані на побудову регуляторів. Головним завданням стало формування бажаної траєкторії вихідного стану ЕМС або максимальне наближення до неї. Механізм формування параметрів регулятора будуватиметься таким чином, щоб похибка відхилення вихідної координати від бажаної добігала до нуля. Значна кількість робіт у цьому напрямку [2–4] і відсутність загального аналітичного розв'язку обумовлена факторами реальної ЕМС: обмеження координат, нелінійності, стохастичність збурень, нестационарність. Все це призводить до похибок на траєкторіях руху і перевизначення сигналу керування на кожному кроці при фактичних умовах. Можливості, що надаються у математичних пакетах, значно полегшують задачу керування, наприклад, автоматизуючи структуру регулятора з використанням блоків Toolbox и BlockSet пакету MATLAB, але обмеження і допущення, які покладені в математичну модель, при цьому не виключаються. Таким чином, встановлення реального стану і параметрів ЕМС набуває першочергового значення. Вирішення цих задач можливе лише за умови, коли математична модель буде тотожною реальній ЕМС, тобто її математичний опис буде враховувати всі особливості та вади, притаманні реальній ЕМС.

**Мета роботи** – параметрична ідентифікація електричних двигунів для налагодження математичних моделей у складі віртуальних комплексів на реальні параметри ЕМС.

Структурна схема віртуального комплексу з моделлю, що дає змогу врахувати всі особливості, притаманні реальній ЕМС, показана на рис. 1.

Відмінністю комплексу від подібних є те, що він містить «Блок коригування», який змінює параметри моделі ЕМС, вирішуючи дві задачі:

- ідентифікації відмінності моделі від реальної ЕМС;
- оптимізаційного настроювання параметрів моделі на реальну ЕМС.

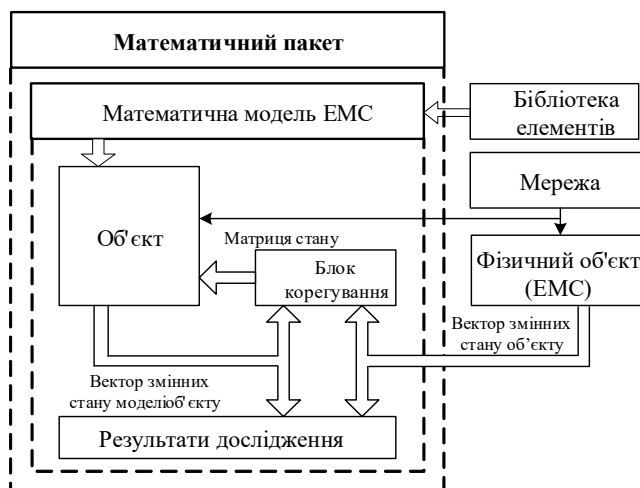


Рис. 1

Математичну постановку задачі здійснимо наступним чином. У загальному випадку ЕМС має множину

параметрів  $S_0$  і характеризується певними властивостями. Кількісною мірою властивостей системи слугує множина характеристик  $Y_0$ , система виявляє свої властивості під впливом зовнішніх дій  $X$ . Множина параметрів  $S$  та їхніх значень відображає її внутрішній зміст – структуру і принципи функціонування. Характеристики  $S$  – це, в основному, її зовнішні ознаки, які важливі при взаємодії з іншими  $S$ .

Характеристики  $S$  знаходяться у функціональній залежності від її параметрів. Кожна характеристика системи  $y_0 \subset Y_0$  визначається в основному обмеженим числом параметрів  $\{S_{0k}\} \subset S_0$ . Інші параметри не впливають на значення даної характеристики  $S$ . При виконанні досліджень нас цікавлять, як правило, тільки деякі характеристики  $S : \{y\} \subset Y_0$  при конкретних діях на систему  $\{x_{mn}\} \subset X$ .

Модель – це також система зі своїми множинами параметрів  $S_m$  і характеристик  $Y_m$ . Реальна ЕМС і модель співпадають за одними параметрами і відрізняються за іншими. Заміщення одного об'єкта іншим правомірне, якщо характеристики ЕМС і моделі визначаються однотипними підмножинами параметрів і зв'язані однаковими залежностями з цими параметрами

$$y_{ok} = f(\{S_{oi}\}, \{x_{oi}\}, T); \quad y_{mn} = f(\{S_{mi}\}, \{x_{mn}\}, T_m), \quad (1)$$

де  $y_{mn}$  – характеристика моделі,  $y_{mn} \subset Y_m$ ;  $x_{mn}$  – зовнішні впливи на модель,  $x_{mn} \subset X$ ;  $T_m$  – модельний час.

При цьому  $s_{oi} = \Psi(S_{mi})$ ;  $x_{on} = \omega(x_{mn})$ ,  $T = mT_m$  (де  $m$  – масштабний коефіцієнт) на всьому інтервалі  $[0..T_m]$  або в окремі періоди часу. Тоді з деяким наближенням можна зробити висновок про те, що множина характеристик моделі  $Y_{mk} = \{y_{mk}\}$  є відображенням множини характеристик ЕМС  $Y_{ok} = \{y_{ok}\}$ , тобто  $\varphi : Y_{ok} \rightarrow Y_{mk}$ .

За такої математичної формалізації для дослідження  $S$ , у яких відомі  $Y_{ok}$  і дослідження принципів взаємодії елементів, стає можливим розв'язок задачі побудови бажаної математичної моделі. Базова відома математична модель з відомими характеристиками  $Y_{mk}$  і ЕМС досліджуються при еквівалентних зовнішніх діях  $\{x_{mn}\}$  ( $\omega : \{x_{on}\} \rightarrow \{x_{mn}\}$ ). Якщо виявляється, що має місце відображення  $\varphi : Y_{ok} \rightarrow Y_{mk}$  із деякою відомою функцією  $\varphi$ , то можна вважати, що математична модель і ЕМС мають однакові параметри.

Здійснимо розв'язання задачі параметричної ідентифікації математичної моделі, адекватної об'єкту за поведінкою (за динамічними властивостями), відповідно до обраних при ідентифікації критеріїв подібності.

Як критерій ідентифікації прийнято квадрат відхилень значень змінних стану, отриманих шляхом математичного моделювання та під час безпосередньої експлуатації ЕМС, тобто виконання технологічного процесу

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K e_{n,k}^2 \Rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $N$  – число вимірювань,  $K$  – число параметрів, що ідентифікуються. Похибка ідентифікації  $e = Y - Y_m$ , де  $y_{1,k}, y_{2,k}, \dots, y_{n,k} \in R^k$  та  $y_{1m,k}, y_{2m,k}, \dots, y_{nm,k} \in R^k$  – експериментальні дані та дані моделі відповідно є нелінійною функцією невідомих параметрів  $\alpha_m$  моделі, визначається як  $e = y - f(\alpha)$ ,  $\alpha \in A \subseteq R^m$ ,  $f(\alpha)$  – функція неперервна на  $R^m$ ,  $m \leq n$ .

Експериментальні дослідження процесу параметричної ідентифікації виконано для лабораторної установки за системою Г-Д. Ідентифікацію проведено для двигуна постійного струму (ДПС) серії ПЗ1 та асинхронного двигуна (АД) 4АХ90Д4УЗ. Вимірювання змінних стану електричних машин здійснювалося датчиками: кутової частоти – тахогенератором Д1-ММ, напруги на якорі – НСРЛ 7800А, струмів статора, якоря і збудження – АС750LCA 050, як АЦП застосовано перетворювач mDAQ.

Модель двигуна постійного струму прийемо у вигляді системи диференціальних рівнянь

$$L_d \frac{di}{dt} = u_d - iR_d - k\phi_d \omega; \quad J_d \frac{d\omega}{dt} = k\phi_d i - M_c; \quad L_f \frac{di_f}{dt} = u_f - i_f R_f; \quad k\phi_d = f(i_f), \quad (3)$$

де  $U_d, U_f$  – напруга на якорі і на обмотці збудження,  $L_d, R_d, L_f, R_f$  – індуктивність і активний опір якоря і обмотки збудження,  $J_d$  – момент інерції,  $k\phi_d$  – коефіцієнт магнітного потоку,  $k\phi_d = f(I_f)$  – нелінійна залежність коефіцієнта магнітного потоку від струму збудження, яка враховує криву намагнічення.

Система диференціальних рівнянь електричної рівноваги кіл статора (індекс  $s$ ) і ротора (індекс  $r$ ) для миттєвих значень напруг, струмів і поточкозчеплення, записана в матричній формі, має вигляд

$$u_s = r_s i_s + \frac{\Psi_s}{dt}; \quad u_r = r_r i_r + \frac{\Psi_r}{dt}. \quad (4)$$

де  $u_s = [u_A, u_B, u_C]^T$ ,  $u_r = [u_a, u_b, u_c]^T$  – матриці миттєвих значень фазних напруг, (значення напруг  $u_a, u_b, u_c$  для асинхронного короткозамкнутого двигуна дорівнюють нулю);  $i_s = [i_A, i_B, i_C]^T$ ,  $i_r = [i_a, i_b, i_c]^T$  – матриці миттє-

вих значень струмів у фазах;  $\Psi_s = [\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C]^T$ ,  $\Psi_r = [\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c]^T$  – матриці повних поточкозчеплень фазних обмоток;  $r_s, r_r$  – активні опори обмоток статора і ротора.

Властивості такої моделі добре відомі й вона найбільш адекватно відображає електромагнітні та електромеханічні процеси у двигуні. Під час проведення досліджень початкові умови для налаштування моделі були розраховані на основі каталожних даних. Визначалися такі параметри моделі ДПС (3): еквівалентний опір  $R_e$ , коефіцієнт магнітного потоку  $k\phi$ , момент інерції  $J$ , еквівалентна індуктивність  $L_e$  та АД (4): активні опори фаз статора і ротора  $R_1, R_2$ , індуктивний опір короткого замикання  $x_k$ , момент інерції  $J_{ad}$ . Параметри  $k\phi$  і  $L_e$  для порівняння з ідентифікованими були розраховані на основі каталожних даних.

На рис. 2 показано часові залежності: а) струму якоря і кутової частоти обертання якоря ДПС та б) струму статора і кутової частоти обертання ротора АД: 1 – отримані моделюванням з параметрами, що ідентифіковані; 2 – експериментальні.

Проведені дослідження дали змогу окреслити підхід до ідентифікації параметрів ЕМ на основі застосування комплексу методів: виділення за допомогою методів глобального пошуку навколо глобального мінімуму й уточнення рішення за допомогою методів прямого пошуку. Як математичні методи, що застосовані у алгоритмі ідентифікації, були використані метод Холтона для визначення області знаходження глобального мінімуму та метод Левенбера-Марквардта – для знаходження остаточного рішення [5]. У таблиці наведено відносні похибки (%) ідентифікованих параметрів до каталожних.

Параметри ДПС				Параметри АД				
$R$	$J$	$k\phi$	$L$	$R_1$	$R_2$	$L_1$	$L_2$	$J_{ad}$
4,2	4,4	21,1	18,8	15,4	8,1	7,1	3,7	5,6

Оцінкою адекватності отриманих параметрів є також співпадіння експериментальних і розрахункових часових залежностей. Значення коефіцієнта детермінації становить 82 % для струму якоря, 93 % – для кутової швидкості ДПС та 73% – для струму фази статора і 89% – для кутової частоти обертання АД.

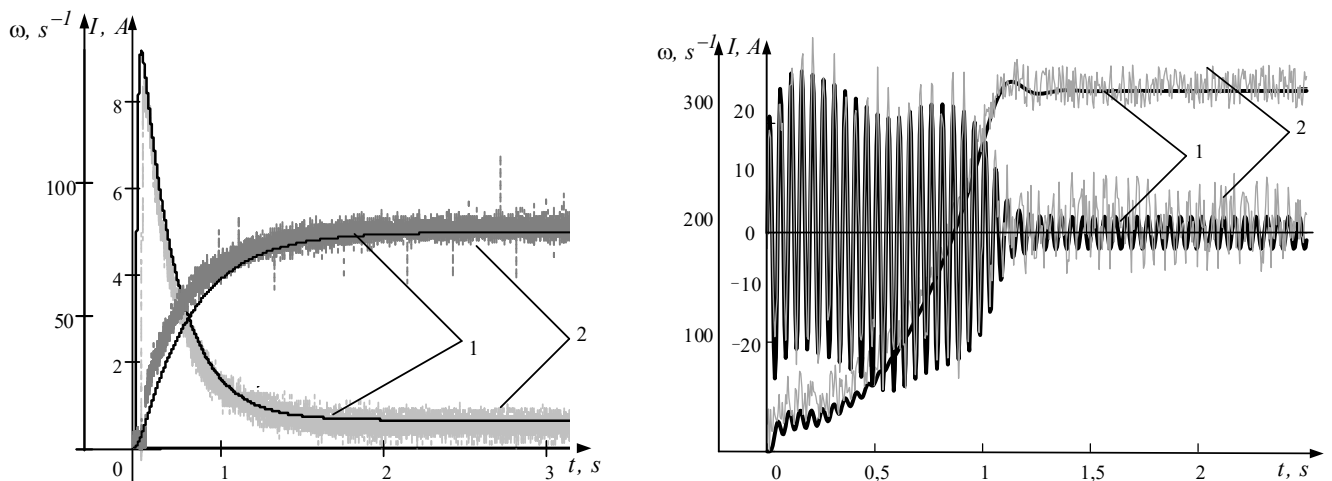


Рис. 2, а, б

**Висновки.** За результатами дослідження встановлено, що застосований на основі методів глобального пошуку підхід до параметричної ідентифікації може бути використаний для розв'язання задач визначення реальних параметрів електромеханічних систем та налагодження на них математичних моделей, у тому числі за наявності нелінійностей, притаманних реальній електромеханічній системі. Віртуальний комплекс, налаштований на реальну електромеханічну систему, дає змогу вирішити низку задач: дослідження і діагностику ЕМС, проведення експериментальних досліджень, які не завжди можливо виконати на експериментальній установці; встановлення допустимості та уточнення меж застосування різних режимів роботи ЕМС; оцінку експлуатаційного стану системи й її конструктивних елементів; дослідження причин аварій ЕМС і пошкоджень її складових.

1. Чорний О.П., Загірняк М.В., Сергієнко С.А. Підвищення якості підготовки фахівців на основі віртуальних лабораторних комплексів. Кременчук: КрНУ, 2017. 198 с.

2. Pothiya S., Chanposri S., Kamsawang S. and Kinares W. Parameter Identification of a DC Motor Using Tabu Search. *KKU Engineering Journal*. 2003. Vol. 30. No 3. Pp. 173–188.

3. Udomsuk S., Areerak K-L., Areerak K-N. and Srikaew A. Parameters Identification of Separately Excited DC Motor using Adaptive Tabu Search Technique. *IEEE International Conference on Advances in Energy Engineering*

(ICAEE). Beijing, China, 19-20 June 2010. Pp. 48-51. DOI: 10.1109/ICAEE.2010.5557618.

4. Dupuis A., Ghribi M. and Kaddouri A. Multiobjective Genetic Estimation of DC Motor Parameters and Load Torque. IEEE International Conference on *Industrial Technology (ICIT)*. Hammamet, Tunisia, 8-10 Dec. 2004. Vol. 3. Pp. 1511-1514. DOI: 10.1109/ICIT.2004.1490788.

5. Смірнова Ю.А., Чорний О.П., Лашко Ю.В., Абдельмажид Бердай. Аналіз методів ідентифікації для визначення параметрів електричних машин. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2010. Вип. 4/2010 (12). С. 56-61.

УДК 621.313

#### **ВИРТУАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКОЙ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**А.П. Черний**, докт.техн.наук, **С.А. Сергиенко**, канд.техн.наук

**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,**  
ул. Первомайская, 20, Кременчуг, 39600, Украина.

E-mail: [alekseii.chornyi@gmail.com](mailto:alekseii.chornyi@gmail.com), [serhiy.serhiyenko@gmail.com](mailto:serhiy.serhiyenko@gmail.com)

*Представлен подход к решению задачи параметрической идентификации электромеханических преобразователей постоянного и переменного тока в динамических режимах. Приведены экспериментальные исследования процессов идентификации параметров двигателей постоянного тока и асинхронного. Подтверждена эффективность разработанного алгоритма для настройки на реальную электромеханическую систему виртуального комплекса, что позволит решать задачи исследования и диагностики, которые не всегда возможно выполнить на экспериментальной установке; установления допустимости и уточнения границ применения режимов работы электромеханической системы; оценки эксплуатационного состояния системы и ее конструктивных элементов; исследования причин аварий и поврежденных ее составляющих. Библи. 5, табл. 1, рис. 2.*

**Ключевые слова:** электромеханическая система, параметрическая идентификация, виртуальный комплекс.

#### **A VIRTUAL COMPLEX WITH THE PARAMETRIC ADJUSTMENT TO ELECTROMECHANICAL SYSTEM PARAMETERS**

**O.P. Chornyi\***, **S.A. Serhiienko**

**Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,**  
20, Pershotravneva str., Kremenchuk, 39600, Ukraine.

E-mail: [alekseii.chornyi@gmail.com](mailto:alekseii.chornyi@gmail.com), [serhiy.serhiyenko@gmail.com](mailto:serhiy.serhiyenko@gmail.com)

*An approach to the solution to the problem of the parametric identification of direct and alternating current electromechanical transducers in dynamic modes is presented. The experimental research of the processes of the identification of the parameters of a direct current and an induction motor is described. The efficiency of the developed algorithm for the adjustment to the real electromechanical system of the virtual complex is confirmed, which will enable the solution to the research and diagnostic problems that are not always possible to carry out on the experimental plant. The effectiveness of the algorithm for the determination of the admissibility and specification of the limits of the use of the electromechanical system operation, for the assessment of the operational state of the system and its structural units, for the investigation of the causes of breakages and component damages was proved.*

References 5, table 1, figures 2.

**Key words:** electromechanical system, parametric identification, virtual complex.

1. Chorni O.P., Zagirnyak M.V., Serhiienko S.A. Improved quality of specialists training on the basis of virtual laboratory complexes. Kremenchuk: KrNU, 2017. 198 p. (Ukr)

2. Pothiya S., Chanposri S., Kamsawang S. and Kinare W. Parameter Identification of a DC Motor Using Tabu Search. *KKU Engineering Journal*. 2003. Vol. 30. No 3. Pp. 173-188.

3. Udomsuk S., Areerak K-L., Areerak K-N. and Srikaew A. Parameters Identification of Separately Excited DC Motor using Adaptive Tabu Search Technique. IEEE International Conference on *Advances in Energy Engineering (ICAEE)*. Beijing, China, 19-20 June 2010. Pp. 48-51. DOI: 10.1109/ICAEE.2010.5557618.

4. Dupuis A., Ghribi M. and Kaddouri A. Multiobjective Genetic Estimation of DC Motor Parameters and Load Torque. IEEE International Conference on *Industrial Technology (ICIT)*. Hammamet, Tunisia, 8-10 Dec. 2004. Vol. 3. Pp. 1511-1514. DOI: 10.1109/ICIT.2004.1490788.

5. Smirnova Yu.A., Chornyi O.P., Lashko Yu.V., Abdelmajid Berdai. The analysis of the identification methods for the determination of electric machine parameters. *Elektromekhanichni i Enerhozberihaiuchi Systemy*. 2010. No 4/2010 (12). Pp. 56-61.

Надійшла 02.03.2018  
Остаточний варіант 26.06.2018