

## МАКРОМОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПІДЙМАННЯ ОДНОКОВШОВОГО ЕКСКАВАТОРА

© Цяпа В.Б., Козак Ю.Я., Селепина Й.Р. 2010

**Розглянуто систему електроприводу механізму підймання одноковшового екскаватора. Для цієї системи побудовано математичну макромодель з використанням оптимізації на основі експериментальних перехідних характеристик.**

**In the article the electric drive system of getting up mechanism of single-bucket power-shovel is considered. For this system a mathematical macromodel is built with the use of optimization on the basis of experimental transitional descriptions.**

### Постановка задачі

Проблема моделювання складних електромеханічних систем загалом сьогодні є доволі актуальною. У статті запропоноване моделювання на основі співвідношення вхід-вихід, тобто лише за вхідними та вихідними величинами в вигляді «чорної скриньки». Створена з достатньою точністю макромодель системи електроприводу механізму підймання екскаватора.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для математичного моделювання у вигляді вхід-вихід доцільно користуватися математичними макромоделями [2], що дають змогу відтворювати характеристики системи з заданою точністю. Під час створення макромоделей, як вхідні величини, використовується множина динамічних процесів, зокрема перехідних і періодичних.

Для побудови дискретних математичних макромоделей компонент електромеханічних систем використовують метод змінних стану [2, 3], оскільки він є найзручнішим під час аналізу динаміки об'єктів з великим розкидом постійних часу, сумісний з багатьма числовими методами, а матрична форма записування має безперечні переваги під час числового розв'язування. У дискретних рівняннях стану значення змінних у наступній точці визначаються на основі значення вхідного сигналу і вектора змінних стану лише в попередній точці, що спрощує моделювання процесів за допомогою ЕОМ. Для ідентифікації параметрів макромоделей використовується оптимізаційний процес [6]. Цей підхід є зручним і під час формування загальної моделі електромеханічної системи. Успішні спроби створення таких математичних моделей компонент електромеханічних систем зроблені в [3, 4, 5].

### Задача дослідження

У роботі показано математичну макромодель системи електроприводу механізму підйому одноковшового екскаватора, побудовану на основі експериментально знятих вхідних характеристик та загального алгоритму з використанням оптимізації.

### Виклад основного матеріалу

Основними механізмами одноковшових екскаваторів є механізми підймання, тяги та повороту, що експлуатуються в важких умовах роботи, а також значних коливаннях температури навколишнього середовища [1]. Електроприводи основних механізмів працюють в інтенсивному повторно-короткочасному режимі з великою частотою включень, у разі великих перенавантажень, що виникають під час зачерпування, підймання та переносу породи. Тому система електроприводу

повинна забезпечувати надійне обмеження моменту і струму, регулювання швидкості і рекуперацію енергії під час гальмування, а також формування перехідних процесів.

Задовольнити всі перераховані вимоги може лише система електроприводу, яка забезпечує неперервне керування швидкістю механізму у всіх режимах з великою точністю і якістю. Тому для індивідуального електроприводу основних механізмів застосовуються двигуни постійного струму з незалежним збудженням, що керуються зміною напруги в колі якоря за схемою керуючий перетворювач – двигун (КП – Д). В якості КП найчастіше застосовують генератор постійного струму (Г – Д) або тиристорний перетворювач (ТП – Д). Далі розглядатимемо електропривід системи Г-Д. Система керування електроприводом повинна мати достатньо високий коефіцієнт підсилення, що досягається введенням у схему керування полем генератора підсилювача певного виду. Для цього застосовується силовий магнітний підсилювач. Індивідуальні генератори головних електроприводів екскаватора об'єднуються в перетворювальний агрегат, котрий приводиться в рух найчастіше синхронними двигунами з номінальною напругою 6 кВ.

Структурна схема електроприводу є двоконтурною системою підпорядкованого регулювання струму якоря двигуна і напруги перетворювача. Регулятором струму використовується магнітний підсилювач.

Схема керування приводу механізму підймання екскаваторів ЭШ-10/70 А на базі Г-Д, яка керується за допомогою силового магнітного підсилювача, наведена на рис. 1.

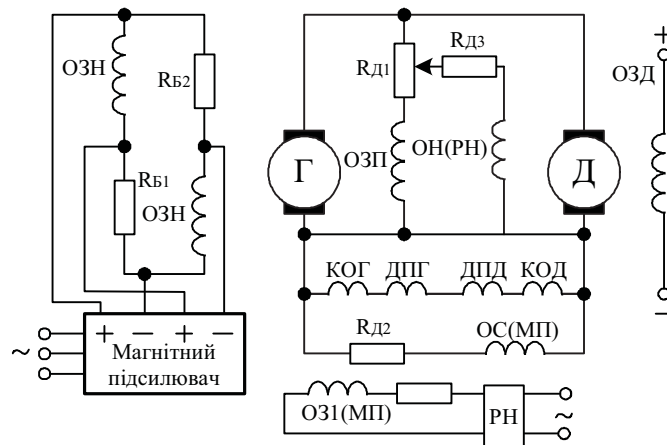


Рис. 1. Схема електроприводу механізму підймання за системою Г-Д з магнітними підсилювачами

Двигун електроприводу підймання Д (існують також дводвигунні системи приводу) живиться від генератора Г, що має дві обмотки збудження: незалежну ОЗН і паралельну ОЗП. Паралельна обмотка збудження через опір  $R_{\delta 1}$  під'єднується на виходи якоря генератора. Обмотка ОЗП створює 25 % сумарної магніторушійної сили (МРС) збудження генератора, решта МРС створюється обмоткою ОЗН, яка живиться від силового магнітного підсилювача ПМС з'єднаного за мостовою схемою. Для цього обмотка незалежного збудження ОЗН генератора розділена на дві півобмотки, що входять в відповідні плечі моста, а два інших плеча створюють баластні резистори  $R_{\delta 1}$  і  $R_{\delta 2}$ . Для досягнення інтегрального закону регулювання струму в зоні струмообмеження, генератор налаштований на критичне самозбудження за допомогою паралельної обмотки ОЗП, яка виконує функцію додатного зворотного зв'язку за напругою, заведеного на генератор. Керування системою електроприводу здійснюється командоконтролером, який у разі перестановки в положення «підймання» забезпечує відповідну полярність задаючого сигналу, що відповідає підйманню ковша драглайна. У разі перестановки ручки командоконтролера в положення «спуск» – змінюється полярність задаючого сигналу, привід працює в напрямку опускання ковша.

У разі опускання ковша здійснюється перехід приводу в режим генераторного гальмування за постійності статичного моменту, що визначається вагою ковша і ґрунту в ньому. У цьому режимі частота обертання більша від швидкості неробочого ходу двигуна.

Осцилограми підймання і опускання ковша наведені на рис.2. (осц.1, осц.2). На осцилограмі 1 показано підймання ковша шляхом подачі напруги  $U_3$ , при цьому протягом 2,2 с двигун працює в перехідному режимі, струм якоря  $I_Д$  досягає значення 815 А. В усталеному режимі напруга двигуна  $U_Д$  (яка є пропорційною до частоти обертання якоря) дорівнює 790 В, струм якоря зменшується до усталеного значення.

При зміні полярності напруги завдання  $U_3$  напруга якоря двигуна  $U_Д$  зменшується до нуля і, змінюючи полярність, зростає до усталеного значення -860 В, при цьому перехідний струм якоря досягає значення -710 А, а при усталеному значенню  $U_Д$  двигун переходить в генераторний режим. Цей перехід характерний для електроприводу підймання під час опускання ковша. Далі процес повторюється. На осцилограмі 2 показаний аналогічний процес, однак при меншій температурі обмоток двигуна.

Характерним для осцилограм є значне запізнення в часі струму якоря двигуна і частоти обертання якоря двигуна по відношенню до задаючого сигналу, що зумовлено інерційністю елементів системи керування і системи електроприводу загалом.

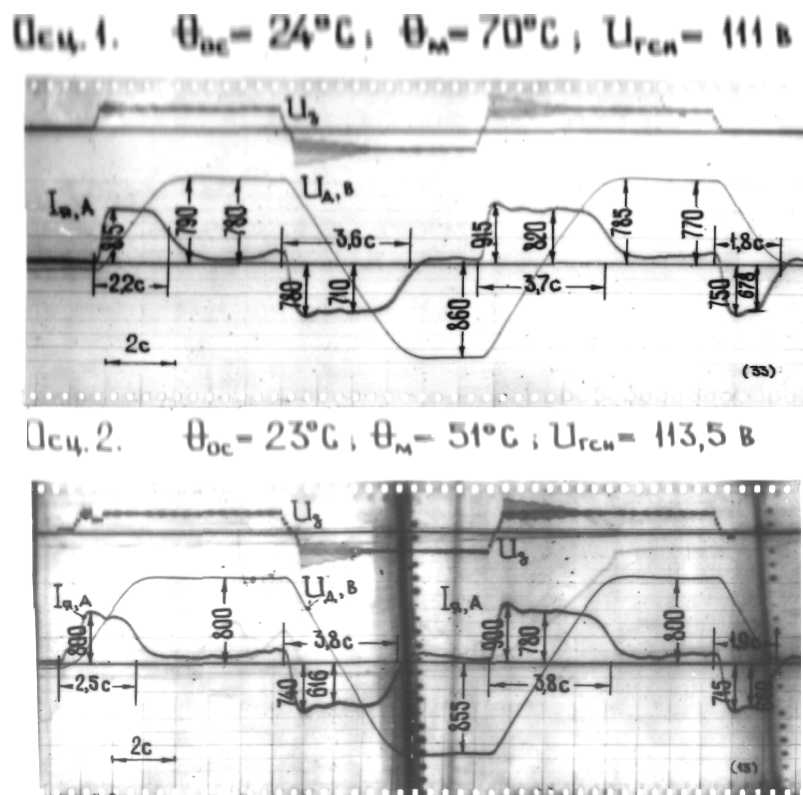


Рис. 2. Осцилограми перехідних процесів пуску, реверсу, гальмування приводу підймання екскаватора ЭШ 10/70А при температурі машини 70 і 51 С відповідно

Технічні дані генератора: тип ГПЭ-85/36-6К, потужність 1000 кВт, номінальна напруга 900 В, номінальний струм 1110 А, частота обертання 1000 об/хв. Технічні дані двигуна приводу підймання: тип МПЭ-450-900, потужність 450 кВт, номінальна напруга 440 В, номінальний струм 1090 А, частота обертання 900 об/хв. Технічні дані силового магнітного підсилювача: УМЗП.25.35.15, Напруга живлення 127 В, частота 50 Гц, номінальна випрямлена напруга 120 В, номінальний струм на виході випростувача 23,5. А.

#### Побудова математичної моделі

Вихідними даними для макромодельовання були криві з осцилограм 1 і 2, задані в дискретній формі. За вхідну величину було прийнято напругу завдання  $U_3$ . Оскільки механізм підймання

ковша характеризується активним моментом статичного навантаження, то було введено ще одну одиничну вхідну величину  $M_{cm}$ . За вихідні величини було прийнято струм якоря  $I_{Я}$  і напругу двигуна  $U_{Д}$ , Отже, вектори вхідних і вихідних змінних в дискретній формі мають такий вигляд:

$$\dot{\vec{v}}^{(k)} = \begin{pmatrix} \dot{U}_3^{(k)} \\ \dot{M}_{cm}^{(k)} \end{pmatrix}, \dot{\vec{y}}^{(k)} = \begin{pmatrix} \dot{I}_{Я}^{(k)} \\ \dot{U}_{Д}^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Макромодель системи електроприводу будуюмо у вигляді дискретного рівняння змінних стану:

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = F\vec{x}^{(k)} + G\vec{v}^{(k)} + \Phi(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}) \\ \vec{y}^{(k+1)} = C\vec{x}^{(k+1)} + D\vec{v}^{(k+1)} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $\vec{x}^{(k)}$ ,  $\vec{v}^{(k)}$ ,  $\vec{y}^{(k)}$  – дискретні значення вектора змінних стану, вхідних і вихідних змінних відповідно;  $F$ ,  $G$ ,  $C$ ,  $D$  – розраховані під час побудови моделі матриці;  $k$  – номер дискрети;  $\Phi(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)})$  – нелінійна вектор-функція, яка в загальному випадку визначається виразом

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}) = & \sum \alpha_{ijlm} \vec{v}_j^{(k)} \vec{v}_l^{(k)} \vec{v}_m^{(k)} + \sum \beta_{ijlm} \vec{x}_j^{(k)} \vec{v}_l^{(k)} \vec{v}_m^{(k)} + \sum \gamma_{ijlm} \vec{x}_j^{(k)} \vec{x}_l^{(k)} \vec{v}_m^{(k)} + \\ & + \sum \delta_{ijlm} \vec{x}_j^{(k)} \vec{x}_l^{(k)} \vec{x}_m^{(k)} + \sum a_{ijl} \vec{v}_j^{(k)} \vec{v}_l^{(k)} + \sum b_{ijl} \vec{x}_j^{(k)} \vec{v}_l^{(k)} + \sum c_{ijl} \vec{x}_j^{(k)} \vec{x}_l^{(k)} \end{aligned}, \quad (3)$$

де  $\alpha_{ijlm}$ ,  $\beta_{ijlm}$ ,  $\gamma_{ijlm}$ ,  $\delta_{ijlm}$  та  $a_{ijl}$ ,  $b_{ijl}$ ,  $c_{ijl}$  – тензори 4-го та 3-го рангу відповідно, розраховані шляхом оптимізації.

Загальну процедуру побудови макромоделі (2) з використанням оптимізації зобразимо так:

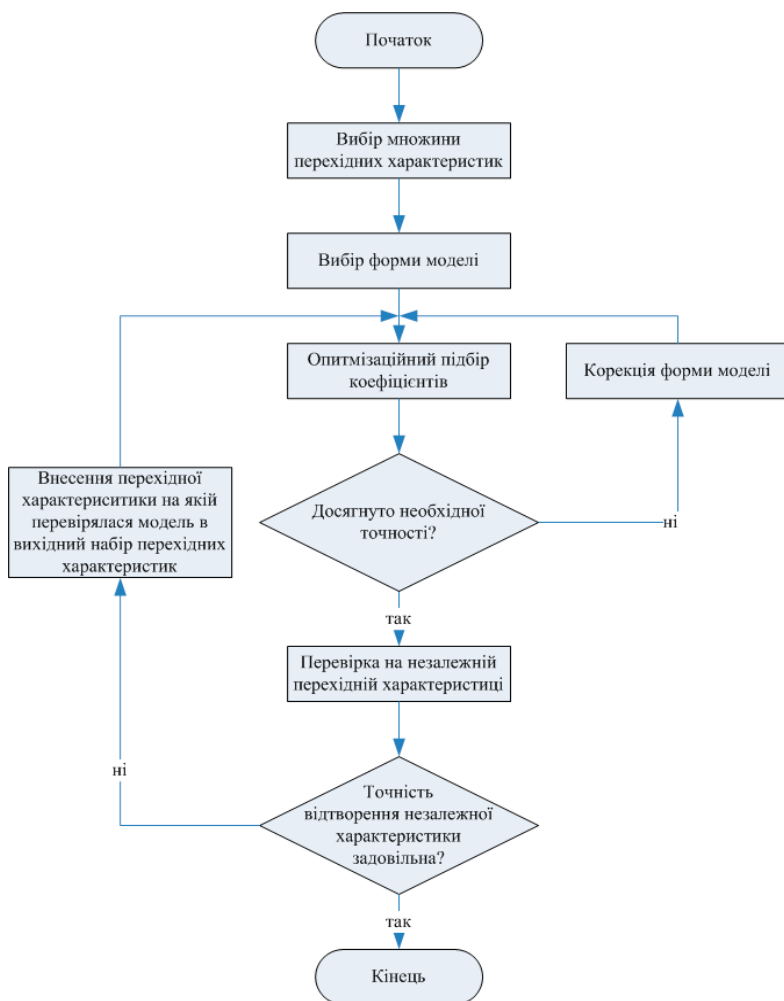


Рис. 3. Процедура побудови макромоделі з використанням оптимізації

Найважчими етапами під час побудови макромоделі з використанням оптимізації є вибір форми моделі і оптимізаційний підбір невідомих коефіцієнтів. З одного боку, вибрана форма повинна бути достатньо гнучкою, щоб описати процеси, що відбуваються в об'єкті. Причому фізика цих процесів вважається невідомою, оскільки побудова ведеться за принципом «чорної скриньки». Врахування цієї вимоги приводить до збільшення кількості коефіцієнтів макромоделі, які потрібно визначити за допомогою оптимізації. З іншого боку, велика кількість коефіцієнтів ускладнює оптимізаційну задачу, що в найкращому випадку приводить до збільшення затрат процесорного часу для їх знаходження, а в гіршому спричиняє зупинення оптимізаційного алгоритму. Вже за наявності 20 невідомих коефіцієнтів важко стверджувати, що мінімум, знайдений за оптимізаційним алгоритмом, є глобальним, і насправді відображає оптимальний набір коефіцієнтів макромоделі.

Вищеописана проблема вирішується по-різному, зокрема, існує декілька підходів, які дозволяють зменшити кількість коефіцієнтів, що підлягають одночасній оптимізації, проте найефективніше виявляється обмеження кількості невідомих коефіцієнтів, враховуючи експертний аналіз вихідних даних і об'єкта макромодельовання.

В нашому випадку можемо стверджувати з різною мірою достовірності, що:

1. Перед початком експерименту об'єкт модельовання перебував у вихідному стані, який описується нульовим значенням вектора  $x$ . Це твердження ґрунтується на тому, що в об'єкті були відсутні механічні рухи, а усі електричні напруги і струми були нульовими. У такому разі можемо не включати початковий стан вектора  $x$  в набір невідомих коефіцієнтів моделі.

2. Наш об'єкт має інерційність. Тобто вхідні величини не впливають на значення вихідних величин миттєво. Це дає змогу вважати матрицю  $D$  нульовою.

3. У нашому об'єкті відсутні періодичні процеси або їхній вплив є незначний. Це твердження ґрунтується на формі перехідних характеристик, і дає змогу вважати позадіагональні елементи матриці  $F$  нульовими.

Отже, для випадку, коли вектор  $x$  має розмірність 3, з 23 коефіцієнтів, що описують лінійну підмодель, в нас залишиться 12. Розглянемо нелінійну частину. Апроксимуватимемо нелінійну функцію  $\Phi$  степеневим рядом, обмежившись третім степенем. Враховуючи, що вхідна величина залишається сталою під час перехідних процесів, вважатимемо, що істотний вплив мають лише коефіцієнти вигляду  $const$ ,  $x_k x_l$  і  $x_k x_l x_m$ , і відкинемо коефіцієнти вигляду  $x_k v_l$ ,  $v_k v_l$ ,  $x_k x_l v_m$ ,  $x_k v_l v_m$  і  $v_k v_l v_m$ . Так отримаємо 51 коефіцієнт, що описує нелінійну частину з 93 можливих, що в сумі дає 63 коефіцієнти макромоделі.

Пошук мінімуму нелінійної функції 63 невідомих залишається занадто важкою задачею, тому спробуємо спочатку обмежити розмірність вектора  $x$  до двох компонент. У такому випадку отримаємо 8 коефіцієнтів з 14 можливих, що описують лінійну частину і 14 з 34 можливих, що описують нелінійну частину. У сумі отримаємо 22 коефіцієнти, що робить реальним практичне розв'язання оптимізаційної задачі.

Після отримання макромоделі з двома компонентами вектора  $x$ , розмірність цього вектора було збільшено до 3, і виконано ще один етап оптимізації. Оптимізаційна задача в цьому випадку включала 63 невідомих компоненти, проте була розв'язана завдяки наявності хорошого початкового наближення – моделі з 2-компонентним вектором  $x$ . Процедура побудови макромоделі відбувається в такому порядку:

1. Після набору вхідних і вихідних даних вибирається форма майбутньої моделі і скорочується кількість невідомих коефіцієнтів на основі аналізу вихідних даних і об'єкта модельовання.

2. Побудова лінійної макромоделі за допомогою оптимізації у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(k+1)} = Fx^{(k)} + Gv^{(k)} \\ \dot{y}^{(k+1)} = Cx^{(k+1)} + Dv^{(k+1)} \end{cases} \quad (4)$$

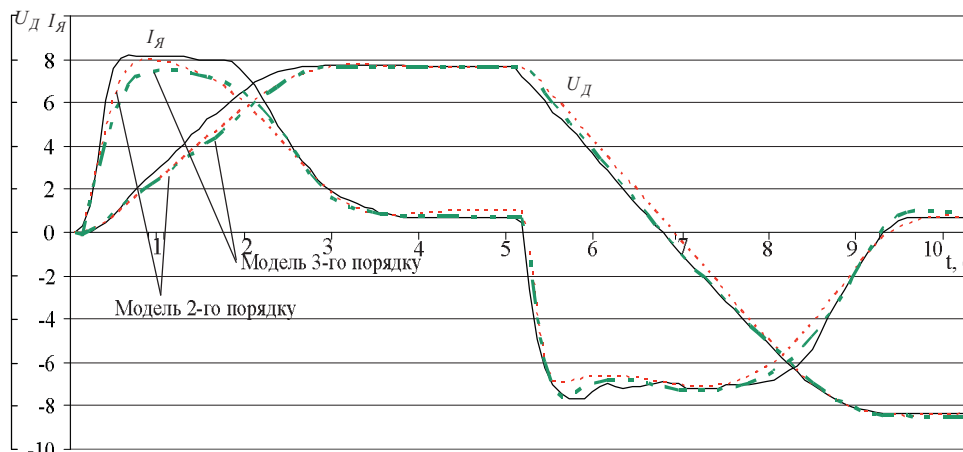
Для оптимізації використовувався метод прямого конуса Растигіна з адаптацією параметрів пошуку.

3. Доповнення лінійної макромоделі нелінійною функцією  $\Phi(\dot{x}^{(k)}, \dot{v}^{(k)})$ .

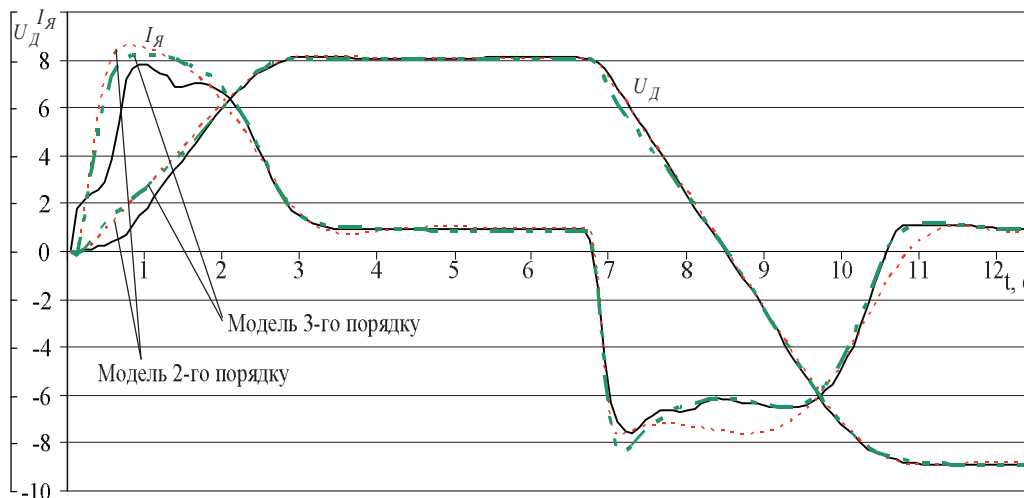
4. Остаточна оптимізація макромоделі, де процедурі оптимізації підлягають усі коефіцієнти лінійної моделі та нелінійної функції.

5. Перевірка отриманих у результаті макромоделювання відгуків на тестові сигнали з даними, знятими експериментально та визначення похибки моделі.

У результаті моделювання було побудовано лінійні та нелінійні макромоделі другого та третього порядку системи електроприводу механізму підймання ковша одноковшового екскаватора. На рис. 4 наведені результати макромоделювання цієї системи для двох моделей. Точність обох моделей зведена в таблицю.



а) Перший вхідний сигнал



б) Другий вхідний сигнал

Рис. 4. Результати макромоделювання системи електроприводу механізму підймання ковша екскаватора:  
(суцільною лінією зображено вхідні змінні, штриховими – відгуки моделі другого та третього порядку)

#### Підсумкові результати точності макромоделювання

Вид моделі	Модель 2-го порядку		Модель 3-го порядку	
	середня похибка	середньоквадратич на похибка	середня похибка	середньоквадратич на похибка
Лінійна	0,145	0,197	-	-
Нелінійна	0,071	0,103	0,051	0,083

## Висновки

Описано систему електроприводу механізму підймання одноковшового екскаватора. Побудовані математичні макромоделі для такої системи з достатньою точністю можуть бути використані для моделювання системи приводу екскаватора, загалом, з метою її подальшого вдосконалення.

1. Ключев В.И., Терехов В.М. *Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учеб. для вузов.* – М.: Энергия, 1980. – 360 с. 2. Стахив П.Г. *Анализ динамических режимов в электронных схемах с многополюсниками.* – Львов: Выси. шк., 1988. – 154 с. 3. Стахив П.Г., Козак Ю.Я. *Побудова макромоделей електромеханічних компонент із використанням оптимізації // Технічна електродинаміка.* – 2001. – № 4. – С. 33–36. 4. Стахив П.Г., Селепина Й.Р., Надич І.І. *// Моделирование компонент электротехнических систем // Сб. тр. конф.: Моделирование-2008 (Simulation-2008). Т. 1. – К., 2008. – С. 344–349.* 5. Стахив П.Г., Козак Ю.Я., Гоголюк О.П. *Макромодель трехфазного силового трансформатора // Электронное моделирование.* – 2005. – Т. 27, № 6. – С. 91–100. 6. Эйхофф П. *Основы идентификации систем управления. Оценка параметров состояния.* – М.: Мир, 1975. – 683 с.

УДК 621.313.33

В. Чабан, З. Гоголь, С. Костючко

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ТЗЕ

## ПОБУДОВА МАТРИЦІ МОНОДРОМІЇ ГЛИБОКОПАЗНИХ АСИНХРОННИХ МОТОРІВ

© Чабан В., Гоголь З., Костючко С., 2010

**Розглядається задача обчислення матриці монодромії глибокопазного асинхронного мотора на підставі використання коло-польової математичної моделі**

**The article considers the problem of determination of monodromy matrix of deep-slot induction motor on the basis of circuit-field mathematical model.**

### Постановка задачі

Матриця монодромії будь-якого фізичного пристрою використовується під час аналізу ustalених процесів, статичної стійкості й параметричної чутливості. Покажемо як знаходити її у разі використання коло-польових математичних моделей електротехнічних пристроїв на прикладі глибокопазного асинхронного мотора з прямокутним пазами ротора.

### Аналіз останніх досліджень

Для розв'язання поставленої задачі необхідно було розв'язати спершу декілька важливих теоретичних задач, зокрема, розробити: загальну теорію електричного скін-ефекту [1], принцип побудови коло-польових математичних моделей електричних пристроїв [2], а також теорію допоміжної моделі параметричної чутливості [3]. Це й стало підставою побудови матриць монодромії систем, що описуються методами електромагнетних кіл і електромагнетного поля.

### Математична модель мотора

Глибокопазні асинхронні мотори проектуються так, щоб поверхневий ефект у пазах обмотки ротора істотно впливав на їхні робочі характеристики, а значить він повинен бути врахований з достатньою точністю, що можливо здійснити лише на підставі рівнянь квазістаціонарного електромагнетного поля. Обмотка ротора машин за кількістю витків вважається приведеною до