

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
“ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Видається з 1964 р.

№ 476

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА.
ІНЖЕНЕРІЯ ДОВКІЛЛЯ.
АВТОМАТИЗАЦІЯ

Відповідальний редактор – проф., д-р техн. наук Є.П. Пістун

Львів

Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”

2003

УДК 626.1.01

У Віснику публікуються результати завершених науково-дослідних робіт співробітників, аспірантів, студентів Національного університету "Львівська політехніка" та науковців інших установ.

Вісник адресований науковим співробітникам та інженерам, які працюють у галузях автоматизації технологічних процесів, теплоенергетики, водопостачання, водовідведення, гідравліки, теплогазопостачання та вентиляції, техногенно-екологічної безпеки виробничих процесів і технологій.

*Рекомендовано Вченою радою Національного університету "Львівська політехніка"
(протокол № 15 засідання від 25.02.2003)*

Редакційна колегія:

проф., д-р техн. наук Є.П. Пістун (відп. редактор);
проф., д-р техн. наук Й.С. Мисак (заст. відп. редактора);
канд. техн. наук Я.В. Грень (відп. секретар);
проф., д-р техн. наук О.Ю. Лозинський;
проф. д-р техн. наук П.Г. Столярчук;
проф., д-р техн. наук В.І. Ткачук;
доц., д-р техн. наук Ю.О. Варецький;
доц., канд. техн. наук В.М. Жук;
доц., канд. техн. наук О.Т. Возняк;
доц., канд. техн. наук З.М. Теплюх

Адреса редколегії:

*Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, Львів-13, 79013.*

В. Кучерук*, О. Войтович*, А. Поджаренко**

*Національний університет „Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

**Вінницький державний технічний університет,
кафедра метрології та промислової автоматички

ВПЛИВ ВНУТРІШНІХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОТОРА НА ЙОГО ВИХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© Кучерук В., Войтович О., Поджаренко А., 2003

The mathematical model of synchronous motor was researched. The diagrams of currents and angular velocity in motor different conditions (start-up, static-state, impact load, redynamic conditions, self-braking) were obtained. The influence of internal parameters (moment of resistance and moment of inertia) on the output synchronous motor characteristics (flux linkages, angular velocity, and angle) in the same condition was researched.

Моделювання на ЕОМ сьогодні є одним з основних методів дослідження складних систем. Особливо значну роль воно виконує у випадках, коли необхідно отримати характеристики складних об'єктів, зокрема синхронних моторів (СМ). Дослідження математичних моделей СМ є важливим етапом при визначенні внутрішніх параметрів та їх впливу на роботу СМ.

Проблему визначення внутрішніх параметрів електромоторів за допомогою функцій чутливості було розглянуто в [1, 2] для асинхронних моторів. Цей підхід дає змогу проаналізувати, в яких режимах і за якими вихідними характеристиками найзручніше визначати внутрішні параметри електромоторів. Для СМ такі функції не були розглянуті.

Тому у цій роботі ставиться завдання дослідити вплив внутрішніх параметрів СМ на його вихідні характеристики в різних режимах роботи електродвигуна. Зокрема дослідити вплив на потокозчеплення та кутову швидкість моменту інерції та моменту опору.

Синхронний мотор є найскладнішим електричним мотором у плані моделювання через наявність в роторі однофазної обмотки збудження і, в окремих випадках, пускової (демпферної) обмотки. Існують різні моделі та схеми заміщення, однак при дослідженнях не враховують другорядні явища та приймають багато припущень [3]:

- магнітне поле в зазорі розглядається як плоскопаралельне;
- якір приймається гладким;
- не враховується спотворення поля;
- крива поля вважається синусоїдною;
- магнітна вісь обмотки збудження збігається з поздовжньою віссю машини;
- магнітні вісі фазних обмоток зсунуті на 120° ;
- нехтують полями вищих гармонік та моментами цих полів;
- розподілення струмів в демпферній обмотці синусоїдне;
- не враховується вплив вихрових струмів та гістерезису;
- не враховується вплив насичення;
- фазні обмотки мають однакові параметри.

При складанні систем диференціальних рівнянь всі параметри, як правило, зводять до системи відносних одиниць.

Моделювання синхронного двигуна можна проводити в трифазній системі координат $\alpha \beta 0$, яка жорстко пов'язана з осями фазних обмоток якоря, чи в двофазній системі координат, яка може бути пов'язаною з якорем (осі α та β) або з ротором (осі d та q). Моделювання в координатах, пов'язаних з якорем, досить ускладнене через те, що в багатьох рівняннях присутній кут положення ротора γ .

Значного спрощення математичної моделі можна досягти за рахунок використання перетворення змінних та систем відносних одиниць. Основним видом перетворення, що використовується при моделюванні СМ, є представлення систем диференціальних рівнянь у прямокутній, жорстко пов'язаній з ротором, координатній системі осей dq . Перетворюються струми, напруги та потокозчеплення статора.

Система рівнянь синхронної машини, з урахуванням демпферних обмоток, у відносних одиницях матиме вигляд [3]

$$\begin{cases} U_d = i_d \cdot r_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega; \\ U_q = i_q \cdot r_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega; \\ U_f = i_f \cdot r_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \\ 0 = i_{ed} r_{ed} + \frac{d\psi_{ed}}{dt}; \\ 0 = i_{eq} r_{eq} + \frac{d\psi_{eq}}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

де

$$\begin{cases} \psi_d = i_d \cdot x_d + i_f \cdot x_{ad} + i_{ed} \cdot x_{ad}; \\ \psi_f = i_d \cdot x_{ad} + i_f \cdot x_f + i_{ed} \cdot x_{ad}; \\ \psi_q = i_q \cdot x_q + i_{eq} \cdot x_{aq}; \\ \psi_{ed} = i_d \cdot x_{ad} + i_f \cdot x_{ad} + i_{ed} \cdot x_{ed}; \\ \psi_{eq} = i_q \cdot x_{aq} + i_{eq} \cdot x_{eq}; \end{cases} \quad (2)$$

U_d, U_q, U_f – проекції напруг статора і ротора на вісі координат d, q ;

$i_d, i_q, i_f, i_{ed}, i_{eq}$ – струми в обмотках статора і ротора;

r_d, r_q, r_f – активні опори статора і ротора;

$\psi_d, \psi_q, \psi_f, \psi_{ed}, \psi_{eq}$ – потокозчеплення статора і ротора в координатах dq ;

ω – кутова швидкість обертання ротора;

$x_d, x_q, x_{ed}, x_{eq}, x_f$ – індуктивні опори у відносних одиницях;

x_{ad}, x_{aq} – взаємні індуктивні опори у відносних одиницях.

Рівняння руху ротора електродвигуна має вигляд [4]

$$M - M_c = H_j \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

де M – електромагнітний момент, який визначається за формулою

$$M = \psi_q \cdot i_q - \psi_d \cdot i_d, \quad (4)$$

де $H_j = \frac{J\omega_0^3}{P_0 \cdot p^2}$ – інерційна стала.

Ці рівняння можуть бути покладені в основу математичної моделі, однак реалізувати їх в такому вигляді досить важко, оскільки ускладнене визначення струмів в контурах. Для їх визначення необхідно попередньо розв'язати систему рівнянь поточкозчеплень відносно струмів в контурах. При цьому, враховуючи відносні одиниці, отримаємо проекції напруж на осі d q:

$$U_d = \cos(t + \pi/2 \cdot y_0), \quad U_q = \cos(t - y_0), \quad (5)$$

де y_0 – кут між магнітною віссю фази та поздовжню віссю ротора d.

Розв'язавши системи рівнянь (1) – (5) відносно поточкозчеплень за допомогою пакета прикладних програм MathCAD, отримаємо такі графіки залежностей кутової швидкості ω , струмів I_d , I_q , I_f в часі при різних режимах роботи синхронного двигуна (рис. 1 – 4). Електричні машини можуть працювати в різних режимах. За основні режими приймемо: пуск-режим, в якому кутова швидкість змінюється від 0 до $\omega_{ном}$; статика-режим, в якому кутова швидкість залишається сталою $\omega_{ном}$; ударне навантаження – раптова зміна моменту опору на валу на короткий проміжок часу; повторно-динамічний режим-вимкнення-вмикання двигуна під час його руху на короткий проміжок часу; самогальмування – гальмування вимкненого СМ, спричинене дією моменту опору на його валу.

На рис. 1 – 4. показані такі режими роботи 0-t₁ – пуск; t₁-t₂ – статика; t₂-t₃ – ударне навантаження; t₃-t₄ – повторно-динамічний режим; t₄-t_k – самогальмування.

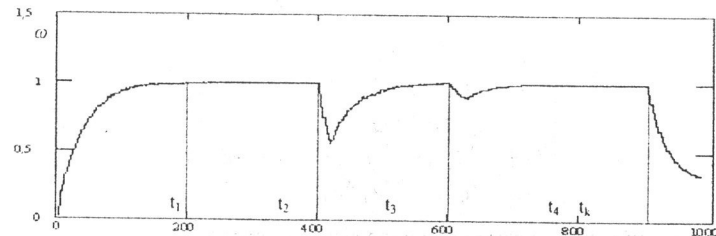


Рис. 1. Залежність кутової швидкості $\omega(t)$ при різних режимах роботи СМ

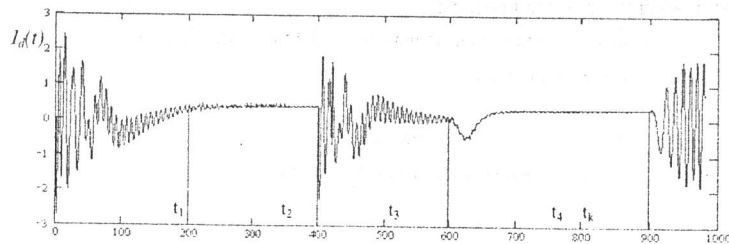


Рис. 2. Залежність струму $I_d(t)$ при різних режимах роботи СМ

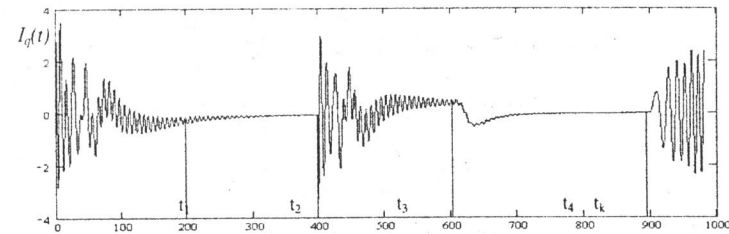


Рис. 3. Залежність струму $I_q(t)$ при різних режимах роботи СМ

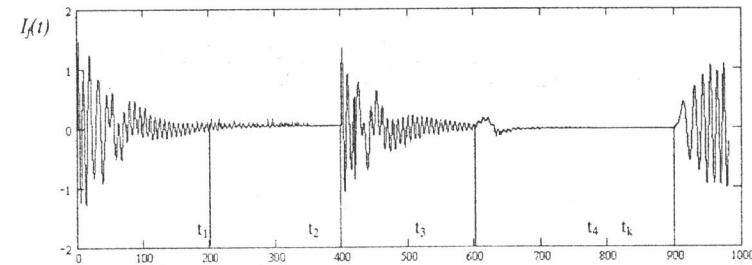


Рис. 4. Залежність струму $I_f(t)$ при різних режимах роботи СМ

Для дослідження впливу внутрішніх параметрів використаємо апарат теорії чутливості [5]. Функція чутливості

$$\frac{\partial \bar{U}(t)}{\partial t} = \frac{\partial \bar{F}}{\partial Y} \bar{U}(t) + \frac{\partial \bar{F}}{\partial A}, \quad (6)$$

де \bar{Y} – вектор стану досліджуваної системи;

\bar{F} – вектор правої частини досліджуваної системи;

\bar{A} – вектор внутрішніх параметрів стану об'єкта;

\bar{U} – матриця функції чутливості.

Вектор стану \bar{Y} :

$$\bar{Y} = (\psi_d, \psi_q, \psi_f, \psi_{ed}, \psi_{eq}, \omega, y_0)^T. \quad (7)$$

Внутрішні параметри СМ запишемо у вигляді вектора

$$\bar{A} = \left(J; \quad M_o \right)^T, \quad (8)$$

де J – момент інерції;

M_o – момент опору.

Дослідимо їх вплив на поточкозчеплення та кутову швидкість обертання $\omega(t)$. Запишемо математичну модель СМ, використавши (7) та (8) у формі [4]:

$$\frac{d\bar{Y}}{dt} = \begin{bmatrix} Um \cdot \cos(t + \pi/2 - Y_6) - r_d \left(\frac{Y_0}{x2d} - \frac{Y_2}{x2df} - \frac{Y_3}{x2ded} \right) + Y_1 Y_5 \\ Um \cdot \cos(t - Y_6) - r_q \left(\frac{Y_1}{x2q} - \frac{Y_4}{x2qeq} \right) - Y_0 Y_5 \\ Uf - r_f \left(\frac{Y_0}{-x2df} + \frac{Y_2}{x2f} - \frac{Y_3}{x2fed} \right) \\ - r_{ed} \left(\frac{Y_0}{-x2ded} - \frac{Y_2}{x2fed} + \frac{Y_3}{x2ed} \right) \\ - r_{eq} \left(\frac{Y_1}{-x2qeq} + \frac{Y_4}{x2eq} \right) \\ \frac{1}{Hj} \left[Y_0 \left(\frac{Y_1}{x2q} - \frac{Y_4}{x2qeq} \right) - Y_1 \left(\frac{Y_0}{x2d} - \frac{Y_2}{x2df} - \frac{Y_3}{x2ded} \right) \right] - M_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} F_1; F_2; F_3; F_4; F_5 \end{pmatrix}^T, \quad (9)$$

де $x2d, x2q, x2f, x2df, x2ded, x2qeq, x2fed, x2ed, x2eq$ – розрахункові коефіцієнти.

Провівши необхідні перетворення, визначимо функції чутливості (6):

$$\frac{du_{11}}{dt} = -r_d \frac{u_{11}}{x2d} + Y_5 u_{21} + r_d \frac{u_{31}}{x2df} + r_d \frac{u_{51}}{x2ded} + Y_1 u_{61} + \cos(t - Y_6) u_{71}$$

$$\frac{du_{21}}{dt} = -Y_5 u_{11} - r_q \frac{u_{21}}{x2q} + r_q \frac{u_{51}}{x2qeq} - Y_0 u_{61} + \sin(t - Y_6) u_{71}$$

$$\frac{du_{31}}{dt} = r_f \frac{u_{11}}{x2df} - r_f \frac{u_{31}}{x2f} + r_f \frac{u_{41}}{x2fed}$$

$$\frac{du_{41}}{dt} = r_{ed} \frac{u_{11}}{x2ded} + r_{ed} \frac{u_{31}}{x2fed} - r_{ed} \frac{u_{41}}{x2ed}$$

$$\frac{du_{51}}{dt} = r_{eq} \frac{u_{21}}{x2qeq} - r_{eq} \frac{u_{51}}{x2eq}$$

$$\frac{du_{61}}{dt} = \frac{1}{Hj} \left[\left(\frac{Y_1}{x2q} - \frac{Y_4}{x2qeq} - \frac{Y_1}{x2d} \right) u_{11} + \left(\frac{Y_0}{x2q} - \frac{Y_0}{x2d} + \frac{Y_2}{x2df} + \frac{Y_3}{x2ded} \right) u_{21} + Y_1 \frac{u_{31}}{x2df} + Y_1 \frac{u_{41}}{x2fed} - Y_0 \frac{u_{51}}{x2qeq} - 1 \right]$$

$$\frac{du_{71}}{dt} = u_{61}$$

$$\frac{du_{12}}{dt} = -r_d \frac{u_{12}}{x2d} + Y_5 u_{22} + r_d \frac{u_{32}}{x2df} + r_d \frac{u_{52}}{x2ded} + Y_1 u_{62} + \cos(t - Y_6) u_{72}$$

$$\frac{du_{22}}{dt} = -Y_5 u_{12} - r_q \frac{u_{22}}{x2q} + r_q \frac{u_{52}}{x2qeq} - Y_0 u_{62} + \sin(t - Y_6) u_{72} \quad (10)$$

$$\frac{du_{32}}{dt} = r_f \frac{u_{12}}{x2df} - r_f \frac{u_{32}}{x2f} + r_f \frac{u_{42}}{x2fed}$$

$$\frac{du_{42}}{dt} = r_{ed} \frac{u_{12}}{x2ded} + r_{ed} \frac{u_{32}}{x2fed} - r_{ed} \frac{u_{42}}{x2ed}$$

$$\frac{du_{52}}{dt} = r_{eq} \frac{u_{22}}{x2qeq} - r_{eq} \frac{u_{52}}{x2eq}$$

$$\frac{du_{62}}{dt} = \frac{1}{Hj} \left[\left(\frac{Y_1}{x2q} - \frac{Y_4}{x2qeq} - \frac{Y_1}{x2d} \right) u_{12} + \left(\frac{Y_0}{x2q} - \frac{Y_0}{x2d} + \frac{Y_2}{x2df} + \frac{Y_3}{x2ded} \right) u_{22} + Y_1 \frac{u_{32}}{x2df} + Y_1 \frac{u_{42}}{x2fed} - Y_0 \frac{u_{52}}{x2qeq} - \right]$$

$$\left[Y_0 \left(\frac{Y_1}{x2q} - \frac{Y_4}{x2qeq} \right) - Y_1 \left(\frac{Y_0}{x2d} - \frac{Y_2}{x2df} - \frac{Y_3}{x2ded} \right) \right] - M_c$$

$$\frac{du_{72}}{dt} = u_{62}$$

Розв'язавши за допомогою пакета прикладних програм MathCAD систему рівнянь (9) – (10), знайдемо шукані функції чутливості.

На рис. 5 – 12 зображені функції чутливості в режимах: 0-t₁ – пуск; t₁-t₂ – статика; t₂-t₃ – ударне навантаження; t₃-t₄ – повторно-динамічний режим; t₄-t_k – самогальмування.

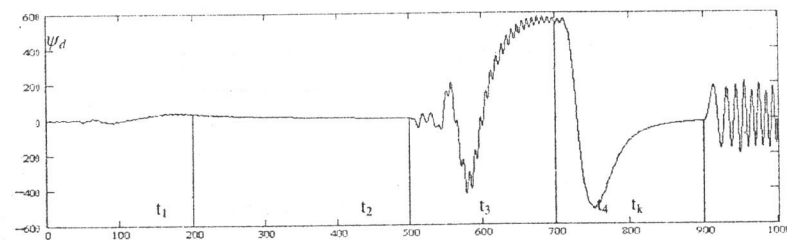


Рис. 5. Чутливість ψ_d за моментом опору M_0

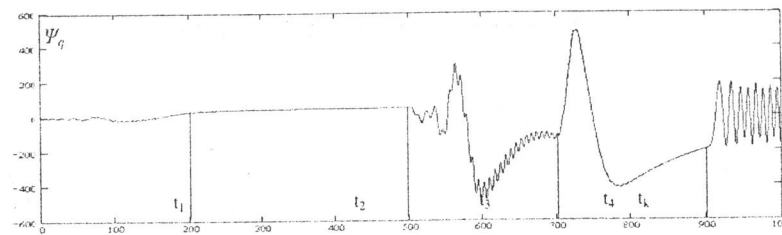


Рис. 6. Чутливість ψ_q за моментом опору M

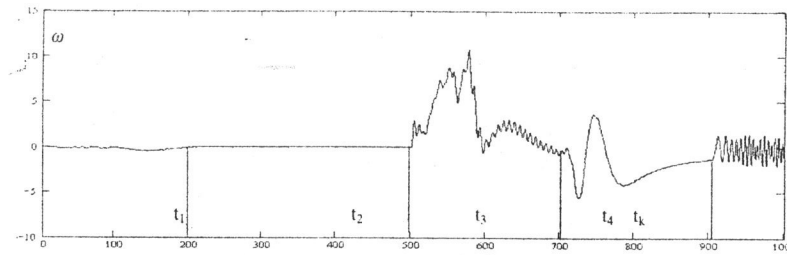


Рис. 7. Чутливість кутової швидкості ω за моментом опору M_o

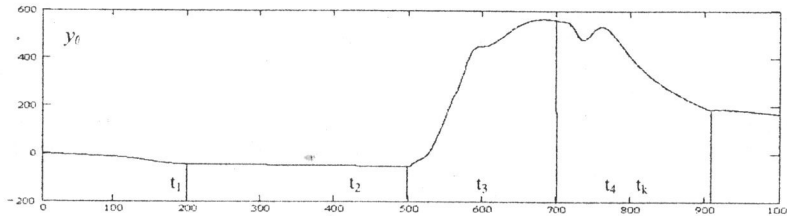


Рис. 8. Чутливість кута y_0 за моментом опору M_o

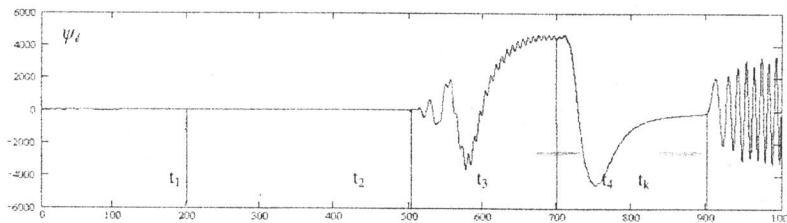


Рис. 9. Чутливість ψ_d за моментом інерції J

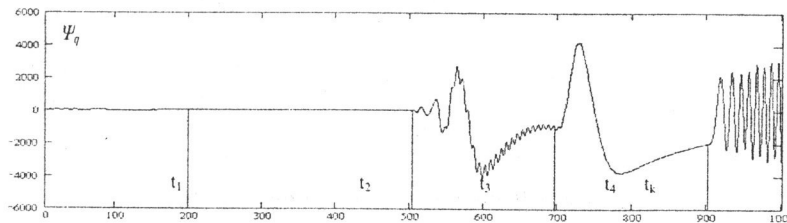


Рис. 10. Чутливість ψ_q за моментом інерції J

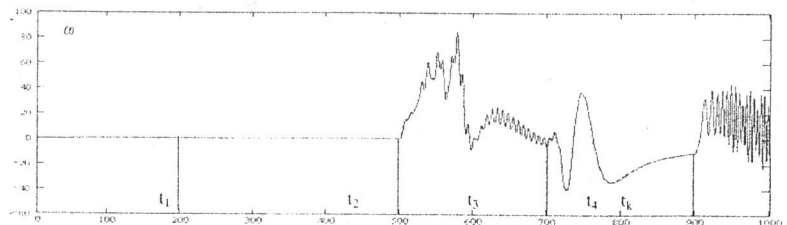


Рис. 11. Чутливість кутової швидкості ω за моментом інерції J

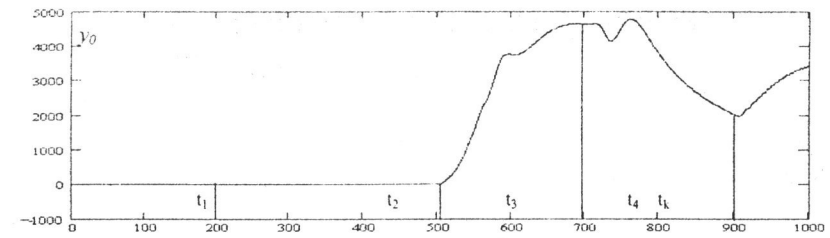


Рис. 12. Чутливість кута y_0 за моментом інерції J

Аналіз результатів моделювання дає можливість зробити такі висновки:

- Досліджено вплив внутрішніх параметрів моменту опору M_o і моменту інерції J СМ на його вхідні характеристики потокозчеплення ψ_d , ψ_q , кутову швидкість ω та кут між магнітною віссю фази і поздовжньою віссю ротора y_0 в різних режимах роботи (пуск, статика, ударне навантаження, повторно-динамічний режим, самогальмування).

- Проведений аналіз показав неоднакову ефективність визначення параметрів M_o і J в різних режимах роботи.

- Статичний режим є неефективним для визначення моменту опору M_o і моменту інерції J . Режим самогальмування є малоефективним для визначення параметрів M_o і J .

- Найбільш репрезентативними для визначення моменту опору M_o і моменту інерції J є режим ударного навантаження та повторно-динамічний режим, в яких функції чутливості носять великі значення.

- Функції чутливості за кутом між магнітною віссю фази та поздовжньою віссю ротора y_0 мають великі значення і не носять коливального характеру, що вказує на можливість визначення всіх необхідних параметрів по процесу $y_0(t)$. Функції чутливості за потокозчепленнями та кутовою швидкістю носять більш коливальний характер, що ускладнює процес отримання необхідних параметрів.

- У випадку обробки даних по потокозчепленням та кутовій швидкості необхідно застосовувати додатковий математичний апарат із-за коливального характеру функцій чутливості, що значно ускладнює обробку результатів.

- В подальшому планується дослідити функції чутливості потокозчеплень та струмів СМ за іншими внутрішніми параметрами, зокрема активними та індуктивними опорами статора і ротора, з метою знаходження найефективніших вихідних характеристик та режимів роботи електромотора для їх визначення.

1. Кучерук В.Ю. Про вибір робочих режимів електричної машини при визначенні її параметрів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 1998. – №1. – С. 85 – 87. 2. Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В., Селезьнова Р.В. Ідентифікація внутрішніх параметрів обмоток електричних машин за допомогою теорії чутливості // Вісн. ДУ „Львівська політехніка”. „Автоматика, вимірювання та керування”. – 2000. – №389. – С. 72 – 81. 3. Ситайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). – М., 1987. 4. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой. – Кременчук, 2001. 5. Розенwasser Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М., 1981.

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ

<i>Крих Г., Самсон А.</i> Покращання якості систем автоматичного регулювання з нечіткою логікою самонастроювання	3
<i>Кучерук В., Войтович О., Поджаренко А.</i> Вплив внутрішніх параметрів електромотора на його вихідні характеристики	10

ТЕОРІЯ ТА ТЕХНІКА ВИМІРЮВАННЯ

<i>Пістун С., Леськів Г.</i> Побудова та моделювання газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів на мостових дросельних схемах	18
<i>Матіко Ф., Учитель І.</i> Моделювання температурного режиму газового потоку при його протіканні через пристрої звуження	27
<i>Дебрянська Р., Стасюк І.</i> Газодинамічні задавачі-витратоміри в системі метрологічного забезпечення побутових лічильників кількості газу	32
<i>Теплюх З., Парнета О.</i> Пристрої рідинного контуру у плівковому витратомірі	37
<i>Лесовой Л.</i> Обчислення витрати пари за методом змінного перепаду тиску	42
<i>Близняк Л.</i> Моделювання рівняння розподілу тиску природного газу в газопроводах різного типу	51
<i>Демчук І., Опанасович В., Слободян М.</i> Проникнення рідини в кулясту частинку, покриту нерозчинною полімерною оболонкою	56
<i>Скрипник Ю., Юрчик Г.</i> Мікропроцесорна система автокалібрування цифрових термоелектричних термометрів в умовах їх експлуатації	61
<i>Фединець В.</i> Вплив захисних екранів термперетворювача на похибку від випромінювання при вимірюванні температури газових потоків	67
<i>Горпенюк А., Дудикевич В., Лагун А.</i> Показниково-степеневий число-імпульсний функціональний перетворювач з поліпшеними метрологічними характеристиками	72
<i>Демідов І., Поджаренко В.</i> Вимірювання витрати води багатоканальними ультразвуковими витратомірами	76

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

<i>Мисак Й., Івасик Я., Гнатичин Я., Лашковська Н., Цепак О., Поберейко Б.</i> Власне енергозабезпечення біогазових установок та математична модель анаеробного процесу	82
<i>Гут П., Крук В., Леськів А.</i> Застосування контактних теплообмінників для утилізації тепла відхідних газів водогрійних котлів	92
<i>Брикайло Р., Брикайло І.</i> Підвищення ефективності роботи системи пиллоприготування котла ТП-92	97
<i>Мисак Й., Гнатичин Я., Крук В., Близнюк В.</i> Зниження рівня окислів азоту при спалюванні низькосортних палив	103
<i>Гнатичин Я., Кузик М., Мисак Й.</i> Папаболоциліндричний сонячний концентратор	107
<i>Матусевич В., Янко П.</i> Робота поверхонь нагріву котлів за умов ерозійного зношення	112

<i>Тимофеев І., Скіра В., Молчанов А., Карпінська І.</i> Кондиціонування води абсорбцією кисню у краплинному режимі	117
<i>Якимів Є., Мисак Й., Крук М.</i> Схеми захисту від корозії котла ТГПМ-314 під час простоювання блока у резерві	120
<i>Грицай В., Юсик Я.</i> Мінімізація енергетичних затрат в кожухотрубних теплообмінниках з рідинними теплоносіями	126

ІНЖЕНЕРІЯ ДОВКІЛЛЯ

<i>Возняк О., Ковальчук А., Гандера О.</i> Повітророзподіл зустрічними неспіввісними круглими струминами при стаціонарному режимі	135
<i>Возняк О., Юркевич Ю., Желих В.</i> Теоретичні передумови оптимізації сукупних термореновацій при проведенні енергетичного аудиту будинку	140
<i>Ярослав В., Лабай В.</i> Конвективний теплообмін в каналах вентиляованих повітряних прошарків	146
<i>Караценко В.</i> Регулювання витрат рідин у трубопроводах уведенням гідродинамічно-активних додатків	149