

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

На правах рукопису

ХАДДАД ЗІЯД МУНЕМ

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИМУЛЮВАННЯ
ЧУТЛИВОСТЕЙ ДО ПОЧАТКОВИХ УМОВ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ**

*Спеціальність 05.13.08 - Обчислювальні машини, системи та мережі,
елементи і пристрої обчислювальної техніки та систем керування*

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук.**

Львів 1995

Дисертація є рукопис.

Робота виконана у Львівському Державному університеті
"Львівська політехніка"

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, академік
В.Й.Чабан

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, академік
І.М.Богасько

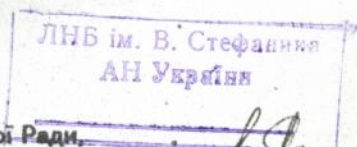
кандидат технічних наук, доцент
В.В.Самотий

Провідна організація - Державний науково-дослідний проектний інститут приладів автоматичного регулювання і систем управління, м.Львів

Захист відбудеться "2" Червня 1995р. о 16 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д04.06.11 при Державному університеті "Львівська політехніка" (290646, м.Львів, вул.С.Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (290013, м.Львів, вул.Професорська, 1).

Автореферат розіслано "28" Квітня 1995р.



Вчений секретар спеціалізованої Ради,
кандидат технічних наук

Я.Т.Луцик

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00779049 (-)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В системах управління й автоматики широко використовуються електромеханічні пристрої, повноцінне проектування яких неможливе без використання методів математичного моделювання та комп'ютерного симулювання.

Дуже важливим моментом є створення прийнятних математичних моделей окремих пристроїв, що дозволяють з одного боку достатньо повно відобразити фізичний процес, а з другого - забезпечити мінімальний об'єм обчислень та максимальну точність.

Математичні моделі електромеханічних пристроїв широко використовуються в задачах аналізу систем управління та автоматики - у розрахунках перехідних та ustalених процесів, статичної стійкості та параметричної чутливості. Побудова об'єднаних алгоритмів аналізу на всіх чотирьох етапах можлива лише з використанням матриць чутливостей. Тому побудова моделей чутливості - одна з актуальних задач в теорії систем управління й автоматики. У даній роботі розроблено теорію моделей чутливості до початкових умов, яка уможливіє об'єднання перших трьох етапів в єдиному алгоритмічному аспекті. Така задача розв'язується вперше. Як приклад, охоплюється розрахунок перехідних й ustalених режимів електромеханічного реле й виконавчого асинхронного мотора з короткозамкнутим ротором.

МЕТА РОБОТИ - розроблення математичних моделей чутливості до початкових умов електромеханічних пристроїв управління з поступовим й обертовим рухом на прикладах реле й асинхронного виконавчого мотора.

НАУКОВА НОВИЗНА.

- розроблено методику формування диференціальних рівнянь електромеханічних пристроїв систем управління, яка дозволяє представляти їх рівняння електромеханічного стану у нормальній формі Коші, що продемонстровано на прикладах електромеханічного реле та виконавчого асинхронного мотора;
- розроблено алгоритм обчислення матриці монодромії рівнянь електромеханічних пристроїв систем управління, яка вперше уможливила побудувати модель чутливості до початкових умов;
- використання моделей чутливості до початкових умов уможливило адаптувати ітераційний метод Ньютона до прискореного пошуку вимушених періодичних електромеханічних режимів пристроїв систем управління як з поступовим (реле), так й обертовим (виконавчий асинхронний мотор) механічними рухами.

ВИХІДНІ ДОПУЩЕННЯ:

- не враховуються втрати в сталі;
- магнетне поле умовно розділяється на дві частини - основне і поле дисипації;
- не враховується насичення магнетних шляхів потоків дисипації;
- не враховується магнетний гістерезис,
- не враховується поверхневий ефект в електричних і магнетних провідниках.

НА ЗАХИСТ ВІНОСИТЬСЯ:

- методика формування нелінійних диференціальних рівнянь стану електромагнетних кіл зі змінними рухомими немагнетними проміжками;
- методика обчислення матриці монодромії рівнянь електромеханічного стану електромагнетного реле й виконавчого асинхронного мотора;
- прискорений пошук вимушених періодичних режимів електромеханічного реле й виконавчого асинхронного мотора як елементів систем управління, що ґрунтується на побудові моделі чутливостей до початкових умов;
- алгоритми й комп'ютерні програми розрахунку перехідних та усталених процесів електромагнетного реле та виконавчого асинхронного мотора.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ:

- розроблена методика формування диференціальних рівнянь електромеханічних пристроїв систем управління дозволила представити рівняння електромеханічного стану реле й виконавчого асинхронного мотора в нормальній формі Коші; це суттєво спрощує процес чисельного інтегрування і сприяє суттєвому підвищенню точності; саме цих два фактори уможливають практичне симулювання порівняно тривалих перехідних процесів.
- розглянуті методи прискореного пошуку вимушених періодичних режимів електромеханічних пристроїв зменшують затрати машинного часу при аналізі усталених режимів та дають можливість вперше отримати розв'язок з наперед заданою точністю;
- на основі запропонованих методик розроблено пакети комп'ютерних програм розрахунку перехідних та усталених процесів електромагнетного реле та виконавчого асинхронного мотора, які можуть бути використані в задачах комп'ютерного симулювання не тільки поокремлених об'єктів, але й як елементів системи.

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.

Робота виконана згідно наукової програми кафедри "Теоретична та загальна електротехніка" Державного університету "Львівська політехніка" в період з 1992 по 1994 роки.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ.

Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на національній та міжнародній конференціях:

- "Моделирование и исследование устойчивости систем", Киев 1994.
- Applied Modelling & Simulation. AMS'93, Lviv. 1993.

ПУБЛІКАЦІЇ.

За матеріалами дисертації опубліковано 3 роботи.

СТРУКТУРА ТА ОБ'ЄМ РОБОТИ.

Дисертаційна робота складається із трьох розділів, висновків і списку літератури у кількості 137 найменувань. Вона має 142 сторінки і містить 100 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ обґрунтовано актуальність, наукову новизну та практичну цінність роботи.

У ДРУГОМУ РОЗДІЛІ запропоновано математичну модель та подано результати комп'ютерного симулювання електромеханічних процесів електромагнетного реле.

Рівняння електромеханічного стану одержано на основі загальної теорії електромагнетних кіл зі змінними немагнетними проміжками (Чабан В.Й. Методи нелінійної електротехніки. - Львів: Світ, 1990).

Рівняння стану обмоток намагаєччування електромагнетного кола мають вигляд

$$\frac{di_{jk}}{dt} = \frac{\rho_{\sigma_{jk}}}{w_{jk}} \left(\frac{1}{w_{jk}} (u_{jk} - r_{jk} \cdot i_{jk}) - \frac{d\Phi_k}{dt} \right), \quad (1)$$

де i_{jk} - струм; u_{jk} - електрична напруга; r_{jk} - омичний опір; $\rho_{\sigma_{jk}}$ - магнетний опір потоків дисипації; w_{jk} - число витків; Φ_k - основний магнетний потік; t - час; тут і надалі індекс k вказує на причетність до k -ої магнетної вітки, а індекс j - до j -го елемента даної вітки.

Основні магнетні потоки знаходимо з рівнянь стану магнетного кола.

$$\sum_k \frac{d\Phi_k}{dt} = 0 ; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_k \left(\sum_{j=1}^{h_k} \rho_{mj k} + \sum_{j=1}^{m_k} \rho_{cj k} + \sum_{j=1}^{q_k} \rho_{vj k} + \sum_{j=1}^{n_k} \rho_{\sigma j k} \right) \cdot \frac{d\Phi_j}{dt} = \\ & = \sum_k \left(\sum_{j=1}^{q_k} v_{j k} \cdot \frac{d\rho_{vj k}}{d\delta_{j k}} \cdot \Phi_j + \sum_{j=1}^{n_k} \rho_{\sigma j k} \cdot \frac{d\Phi_{j k}}{dt} \right), \quad (3) \end{aligned}$$

де $\rho_{cj k}$ - магнетний опір постійного немагнетного проміжку; $\rho_{vj k}$ - миттєве значення магнетного опору змінного немагнетного проміжку; $\delta_{j k}$ - миттєве значення змінного немагнетного проміжку; $v_{j k}$ - миттєве значення швидкості зміни величини магнетного проміжку; h_k, m_k, n_k, q_k - відповідно кількість магнетних однорідних ділянок, немагнетних постійних проміжків, немагнетних сил, змінних магнеторушійних сил; $\rho_{mj k}$ - диференціальний магнетний опір, який визначаємо за середньою кривою намагнетчування феромагнетика $H_{j k} = H_{j k}(B_{j k})$

$$\rho_{mj k} = \frac{dV_{j k}(\Phi_k)}{d\Phi_k} = \frac{l_{j k}}{S_{j k}} \cdot \frac{dH_{j k}}{dB_{j k}} = \frac{l_{j k}}{S_{j k} \cdot \mu_{j k}(B_{j k})}, \quad (4)$$

причому $\mu_{j k}$ - диференціальна магнетна проникність, $V_{j k}$ - магнетна напруга на j -й ділянці вітки; $l_{j k}$ і $S_{j k}$ - відповідно довжина і поперечний переріз j -ої ділянки магнетопроводу.

Рівняння механічного стану одержуємо за рівняннями руху Лагранжа другого роду

$$\frac{dv_{jk}}{dt} = \frac{1}{m_{jk}} \left(F_{Ejk} - F_{Mjk}(\delta_{jk}) + a_{jk} v_{jk} \right), \quad (5)$$

$$\frac{d\delta_{jk}}{dt} = -v_{jk}, \quad (6)$$

де F_{Ejk} - електромагнетна сила; $F_{Mjk}(\delta_{jk})$ - механічна характеристика; m_{jk} - приведена маса рухомих частин; a_{jk} - коефіцієнт опору руху.

Сумісному інтегруванню підлягає система нелінійних диференціальних рівнянь (1)-(6).

У випадку електромагнетного реле, що містить один магнетний контур ці рівняння набувають вигляду

$$\frac{di}{dt} = \frac{\rho_{\sigma}}{w} \left(u - r \cdot i - w \frac{d\Phi}{dt} \right);$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{v \cdot \frac{1}{S_2 \cdot \mu_0} \cdot \Phi + \frac{\rho_{\sigma}}{w} \cdot (u - r \cdot i) \cdot m}{\frac{l_1}{S_1 \cdot \mu \left(\frac{\Phi}{S_1} \right)} + \frac{l_2}{S_2 \cdot \mu \left(\frac{\Phi}{S_2} \right)} + \frac{\delta}{S_2 \cdot \mu_0} + \rho + w \cdot \rho_{\sigma}}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} \left(\frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S_2} - F(\delta) \right); \quad \frac{d\delta}{dt} = -v. \quad (7)$$

У роботі наведено результати комп'ютерного симулювання перехідних процесів електромагнетного реле в режимах живлення синусоїдальною, постійною та пульсуючою напругами.

В результаті розрахунків було отримано часові криві повного та основного магнетних потоків, швидкості ярма і величини повітряних проміжків електромагнетного реле в перехідних процесах.

На прикладі електромагнетного реле в роботі показано принцип побудови алгоритму прискореного пошуку вимушених періодичних режимів електротехнічних пристроїв, який ґрунтується на використанні моделі чутливості до початкових умов.

Утворюємо колонку невідомих рівняння (7)

$$X = (\Phi, v, \delta)_t. \quad (8)$$

Розрахунок усталеного процесу зводиться до двоточної крайової задачі.

Рівняння періодичності згідно з (7), (8) запишемо так

$$F(X(0)) = X(0) - X(T) = Q, \quad (9)$$

де X - колонка невідомих; Q - колонка різниць невідомих, що встановились на періоді; T - період.

Рівняння (4) запишемо у вигляді

$$\frac{d\Phi}{dt} = D \cdot \frac{1}{w} (u - i \cdot r). \quad (10)$$

Вирази (5),(6),(9),(10) утворюють двоточкову крайову задачу нелінійного диференціального рівняння основного магнетного потоку.

Рівняння періодичності розв'язуємо за ітераційною формулою Ньютона

$$X(0)^{k+1} = X(0)^k - F'(X(0)^k)^{-1} \cdot F(X(0)^k), \quad (11)$$

де $F'(X(0))$ - яacobian системи,

$$F'(X(0)) = \frac{dF(X(0))}{dX(0)}. \quad (12)$$

Згідно з (9) одержуємо:

$$F(X(0)) = 1 - \Sigma(T). \quad (13)$$

де $\Sigma(T)$ - матриця монодромії

$$\Sigma(T) = \frac{dX(T)}{dX(0)}. \quad (14)$$

Функцію Σ визначаємо з рівняння першої варіації. Для цього продиференціюємо (7) по $X(0)$, в результаті чого отримуємо:

$$\Sigma = (\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3)_t, \quad (15)$$

де

$$\Sigma_1 = \frac{d\Phi(T)}{dX(0)} = D \cdot S; \quad \Sigma_2 = \frac{dv}{dX(0)}; \quad \Sigma_3 = \frac{d\delta}{dX(0)}, \quad (16)$$

причому

$$D = \frac{d\Phi}{d\Phi_1}; \quad S = \frac{d\Phi_1}{dX(0)}. \quad (17)$$

Щоб знайти функцію S запишемо проміжне рівняння

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{1}{w}(u - i \cdot r). \quad (18)$$

Рівняння першої варіації одержуємо диференціюванням (18) по $X(0)$:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{r}{w^2}(1-D) \cdot S. \quad (19)$$

Функції Σ_1 і Σ_2 знаходимо з рівнянь першої варіації одержаних диференціюванням (1), (5) по $X(0)$:

$$\frac{d\Sigma_2}{dt} = \frac{1}{m} \left(\frac{\Phi}{S_2 \cdot \mu_0} \cdot D \cdot S - \frac{dF_M(\delta)}{d\delta} \cdot \Sigma_3 \right), \quad \frac{d\Sigma_3}{dt} = -\Sigma_2. \quad (20)$$

В роботі було проведено розрахунок прискореного пошуку стаціонарного процесу електромагнетного реле при різних напругах (синусоїдальних, пульсуючих, постійних тощо).

В результаті розрахунків було отримано залежності змінних як усталеному процесі так і на проміжних ітераціях формули (11).

Як приклад на рис.1,2,3 приведено вище згадані криві при напрузі живлення $U = 110\sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t)$ (В) і $\delta = 0,0005$ (м). модельного електромагнітного реле.

Розрахунки показали, що використовуючи дану методику для одержання стаціонарного процесу в реле, достатньо 1-2-ох ітерацій.

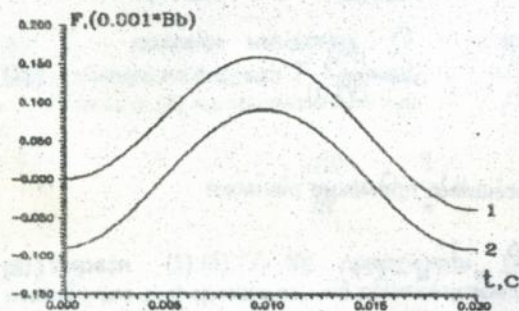


Рис.1

Розрахункова характеристика повного магнетного потоку стаціонарного процесу електромагнітного реле при початковому значенні повітряного проміжку $\delta = 0,0005$ м і змінній на-прузі $U = 110\sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t)$ (В) на 1 ітерації.

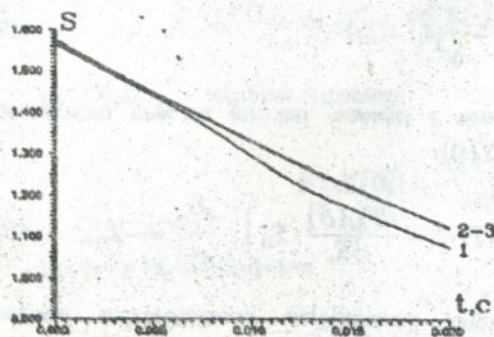


Рис.2

Розрахункові характеристики коефіцієнтів монодромії стаціонарного процесу електромагнітного реле при початковому значенні повітряного проміжку $\delta = 0,0005$ м і змінній напрузі $U = 110\sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t)$ (В) на 2 ітераціях.

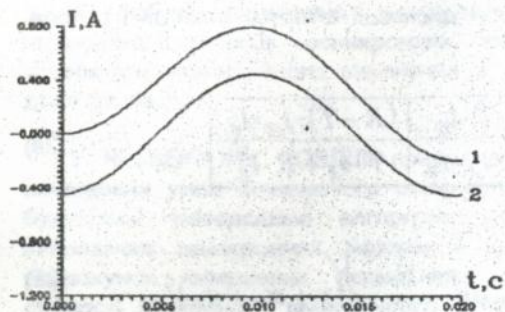


Рис.3

Розрахункова характеристика струму котушки стаціонарного процесу електромагнетного реле при початковому значенні повітряного проміжку $\delta = 0.0005 \text{ м}$ і змінній напрузі $U = 110\sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t) \text{ (В)}$ на 1 ітерації.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ запропоновано математичну модель виконавчого асинхронного мотора. Модель призначена для комп'ютерного симулювання перехідних процесів. Перевагою є те, що диференціальні рівняння, що описують асинхронний виконавчий мотор, записано відносно струмів і в нормальній формі Коші

$$\begin{aligned} \frac{di_S}{dt} &= A_S \cdot (u_S - R_S \cdot i_S) + A_{SR} \cdot (\Omega_R \psi_R - R_R \cdot i_R), \\ \frac{di_R}{dt} &= A_{RS} \cdot (u_S - R_S \cdot i_S) + A_R \cdot (\Omega_R \psi_R - R_R \cdot i_R), \end{aligned} \quad (21)$$

де u_S, i_S - колонки напруг і струмів статора; ψ_R, i_R - колонки повних потокозчеплень і струмів ротора; R_S, R_R - матриці активних опорів обмоток статора і ротора; Ω_R - матриця кутової швидкості

$$h_S(h = u, i) = \begin{bmatrix} h_{SA} \\ h_{SB} \end{bmatrix}; \quad h_R(h = \psi, i) = \begin{bmatrix} h_{RA} \\ h_{RB} \end{bmatrix}; \quad \Omega_R = w \begin{bmatrix} -1 & \\ & 1 \end{bmatrix}; \quad (22)$$

причому w - кутова швидкість обертання ротора; A_S, A_{SR}, A_{RS}, A_R - матриці питомих диференціальних магнетних опорів

$$A_S = \alpha_S(1 - \alpha_S \cdot G), \quad A_R = \alpha_R(1 - \alpha_R \cdot G), \quad A_{SR} = A_{RS} = -\alpha_S \cdot \alpha_R \cdot G, \quad (23)$$

де α_S, α_R - обернені індуктивності дисипації обмоток статора і ротора. Матриця G має вигляд:

$$G = \frac{1}{i_m^2} \begin{array}{|c|c|} \hline R \cdot i_A + T \cdot i_B & (R-T) \cdot i_A \cdot i_B \\ \hline (R-T) \cdot i_A \cdot i_B & T \cdot i_A + R \cdot i_B \\ \hline \end{array}, \quad (24)$$

де

$$R = \frac{1}{(\alpha_S + \alpha_R + \rho)}; \quad T = \frac{1}{(\tau + \alpha_S + \alpha_R)}; \quad (25)$$

причому

$$i_A = i_{SA} + i_{RA}; \quad i_B = i_{SB} + i_{RB}; \quad i_m = \sqrt{(i_A^2 + i_B^2)}. \quad (26)$$

Диференціальний ρ і статичний τ магнетні опори знаходимо за кривою намагнення мотора

$$\psi_m = \psi_m(i_m); \quad \tau = \frac{i_m}{\psi_m} = \tau(i_m); \quad \rho = \frac{di_m}{d\psi_m} = \rho(i_m), \quad (27)$$

тут i_{SA}, i_{SB} - струми статорних обмоток управління і робочої; i_{RA}, i_{RB} - струми еквівалентних контурів ротора; i_m - струм намагнення.

Рівняння руху ротора береться у вигляді:

$$\frac{dw}{dt} = p_0 (M_e - M_M) / J, \quad \frac{d\gamma}{dt} = w, \quad (28)$$

де w - кутова швидкість обертання ротора, M_e - електромагнетний момент, M_M - момент опору, p_0 - число пар магнетних полюсів, J - сумарний момент інерції на валу ротора; γ - кут повороту ротора.

Електромагнетний момент знаходимо за формулою:

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p_0 \cdot (\psi_{RA} \cdot i_{SB} - \psi_{RB} \cdot i_{SA}). \quad (29)$$

Вирази (21),(28) утворюють повну систему диференціальних рівнянь виконавчого асинхронного мотора.

У роботі приведено результати комп'ютерного симулювання перехідних процесів асинхронних моторів, як виконавчих так і промислово-комерційного виконання з результатами експериментальних досліджень.

У ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ приводиться теорія моделі чутливості до початкових умов виконавчого асинхронного мотора. Саме на її основі будуються універсальні алгоритми всього комплексу задач аналізу виконавчих асинхронних моторів - розрахунок перехідних процесів, розрахунок вимушених періодичних режимів, розрахунок статичної стійкості знайденого періодичного розв'язку. Одержані результати при потребі можуть бути узагальнені на випадок обчислення і матриці параметричної чутливості.

Матриці чутливостей використовуються також у задачах оптимального проектування. Їх рядки є градієнтами шуканих функцій в просторі постійних параметрів а колонки визначають міру впливу одного з параметрів на всю множину шуканих функцій.

Диференціальні рівняння електромеханічного стану виконавчого асинхронного мотора (21), (27) запишемо в загальному вигляді:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t), \quad (30)$$

де x - колонка невідомих

$$X = (i, w)_t, \quad (31)$$

причому i - колонка струмів (статора та ротора).

При різних початкових умовах $X(0)$ отримуємо різний характер протікання перехідного процесу. Існують такі початкові умови, які дозволяють отримати стаціонарний процес, обминаючи перехідний, тобто виключити перехідну реакцію.

У такому вигляді рівняння стану повинно задовільняти умові періодичності

$$F(X(0)) = X(0) - X(T) = 0, \quad (32)$$

де T - період.

Вираз (33) є лінійним алгебраїчним рівнянням, аргументом якого є $X(0)$.

Розв'язувати (30) будемо методом Ньютона за формулою (11). При цьому формули (12)-(14) зберігають свою силу.

Коефіцієнти (22)-(27) є складними функціями шуканих змінних - струмів і кутової швидкості. Це практично виключає можливість диференціювання рівнянь електромагнетного стану по матриці-стовпці змінних. Тому відомі підходи тут непридатні і прийшлося шукати інакше розв'язання проблеми, його суть полягає в тому, що вводиться допоміжна матриця чутливості Z .

Для цього утворюємо допоміжну колонку невідомих

$$Y = (\psi, w)_t, \quad (33)$$

де $\psi = (\psi_{SA}, \psi_{SB}, \psi_{RA}, \psi_{SB})_t$ - колонка повних поточкозчеплень.

Матрицю монодромії визначимо так

$$\Phi = \frac{dx}{dX(0)}. \quad (34)$$

Вираз (34) можна записати у вигляді добутку

$$\Phi = P \cdot S,$$

$$\text{де } P = \text{diag}(A, 1), \quad S = (Z, W)_t, \quad (35)$$

$$\text{причому } Z = \frac{d\psi}{dX(0)}; \quad W = \frac{dw}{dX(0)}. \quad (36)$$

З метою визначення матриці $\frac{di}{d\psi}$ запишемо допоміжне диференціальне рівняння

$$\frac{d\psi}{dt} = (u + \Omega \cdot \psi - R \cdot i), \quad (37)$$

$$\text{де } h(h = \Psi, U, I) = (h_S, h_R)_t; \quad \Omega = \text{diag}(1, \Omega_k); \quad R = \text{diag}(R_S, R_k); \quad (38)$$

Продиференціювавши (36) по $X(0)$, одержуємо рівняння першої варіації:

$$\frac{dZ}{dt} = (\Omega - R \cdot A) \cdot Z + \frac{d\Omega}{dw} \cdot W \cdot \psi, \quad (39)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{P_0}{J} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot P_0 \cdot \left(\frac{d\psi_{RA}}{dX(0)} i_{SB} + \psi_{RA} \cdot \frac{di_{SB}}{dX(0)} - \frac{d\psi_{RB}}{dX(0)} i_{SA} - \psi_{RB} \cdot \frac{di_{SA}}{dX(0)} \right) - \frac{dM}{dw} \cdot W \right). \quad (40)$$

Матрицю $\frac{dM}{dw}$ отримуємо аналітично із заданої функціональної залежності $M = M(w)$.

На кожній ітерації формули (11) сумісному інтегруванню підлягає система звичайних нелінійних диференціальних рівнянь (21),(28),(39),(40).

Ідея об'єднаного алгоритму розрахунку перехідних й усталених процесів будується на обході ітераційної формули (11), що найпростіше досягається спрямуванням періоду T до нескінченності. При потребі дослідження статичної стійкості, достатньо обчислити мультиплікатори матриці $\Phi(T)$ в усталеному процесі. Якщо всі вони менші одиниці - процес стійкий, у противному разі - нестійкий.

У роботі приведені чисельні приклади прискореного пошуку вимушених періодичних режимів виконавчого конденсаторного мотора, а також режимів асинхронних машин промислово-комерційного виконання, для яких були заздалегідь відомі осцилограми натурних експериментів.

На рис. 4-6 приведено розрахункові криві струмів статорних обмоток і кутової швидкості мотора КД-50М, що привели до усталеного режиму.

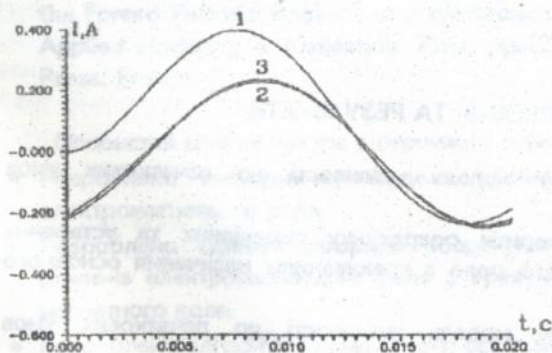


Рис.4

Розрахункові характеристики струму фази А статора стаціонарного процесу конденсаторного мотора КД-50М при $M_n = 0.001H \cdot m$ на 3 ітераціях.

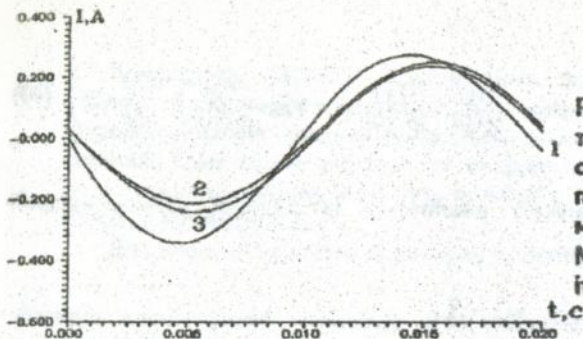


Рис.5
Розрахункові характеристики струму фази В статора стаціонарного процесу конденсаторного мотора КД-50М при $M_H=0.001H^*M$ на 3 ітераціях.

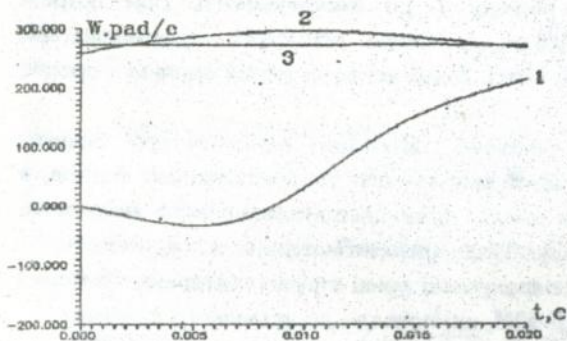


Рис.6
Розрахункові характеристики кутової швидкості стаціонарного процесу конденсаторного мотора КД-50М при $M_H=0.001H^*M$ на 3 ітераціях.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

- Розроблено математичну модель чутливості до початкових умов електромагнетного реле.
- Розроблено єдиний алгоритм розрахунку перехідних та усталених режимів електромагнетного реле з урахуванням насичення основного магнетного кола.
- Розроблено математичну модель чутливості до початкових умов виконавчого асинхронного мотора.

- Розроблено єдиний алгоритм розрахунку перехідних та усталених режимів електромагнетного виконавчого асинхронного мотора з врахуванням насичення основного магнетного кола.
- Розроблені алгоритми розрахунку усталених електромеханічних процесів пристроїв систем керування, вперше уможливили здійснювати розрахунок з наперед заданою точністю, оскільки розв'язується двоточкова крайова задача звичайних диференціальних рівнянь.
- Отримані в роботі диференціальні рівняння електромеханічних пристроїв можуть бути використані в задачах аналізу та оптимального проектування систем управління й автоматики як рівняння окремих їх елементів.

Основний зміст проведених досліджень викладений у таких роботах:

- Чабан В., Білий А., Хаддад З. Математичне моделювання й симулювання усталених процесів електромагнітних й електромеханічних пристроїв / Тезиси докладов української конференції "Моделирование и исследование устойчивости систем", Киев 1994.- С.137.
- Tchaban V., Bily L., Dmytryshyn O., Haddad Z. Mathematical Modelling of Transient and Steady-State Regimes of Squirrel-Cage Induction Motors with Deep Slots. Applied Modelling & Simulation. Summaries of accepted Communications. p.58, 1993. AMS Press. France.
- Tchaban V., Bily L., Dmytryshyn O., Haddad Z. The Accelerated Search of the Forced Periodic Regimes of Asynchronous Motors with Deep Slots. / Applied Modelling & Simulation. Proc. pp.123- 128, AMS'93. 1993. AMS Press. France.

Особистий внесок автора в отриманні основних результатів дисертації:

- Розроблено математичну модель чутливості до початкових умов електромагнетного реле.
- Розроблено єдиний алгоритм розрахунку перехідних та усталених режимів електромагнетного реле з врахуванням насичення основного магнетного кола.
- Розроблено алгоритм і комп'ютерну програму розрахунку перехідних та усталених режимів виконавчого асинхронного мотора з урахуванням насичення основного магнетного кола.

АНОТАЦІЯ

Хаддад З.М. Математическое моделирование и моделирование чувствительности к начальным условиям электромеханических устройств систем управления.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.08 - Вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. Львовский государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1995.

Диссертация посвящена построению матриц моделей чувствительности к начальным условиям дифференциальных уравнений электромеханических устройств систем управления. Рассмотрены случаи поступательного (электромеханическое реле) и вращательного (исполнительный асинхронный двигатель) движений. Разработаны общие программы компьютерного моделирования переходных и установившихся режимов этих устройств как задачи Коши и двухточечной краевой задачи.

Haddad Z.M. Mathematical Modeling And Simulation Of The Sensitivity To The Initial Conditions Of The Electromechanical Devices Of The Regulation Systems.

Candidate of science dissertation. Speciality 05.13.08 - Computers, systems and nets, computer and regulation system's elements and devices. State University "Lviv Polytechnic", Lviv, 1995.

The dissertation is devoted to the models of the sensitivity to the initial conditions of the differential equations of the electromechanical devices of the regulation systems creation. Cases of linear (electromechanical switch) and rotational (pilot asynchronous motor) moves are investigated. General computer programs of the device's transitional and steady-state regimes simulation in the forms of Couchi task and two-point border task were developed.

Ключові слова:

електромеханічні пристрої систем управління, матриця чутливостей, задача Коші, двоточкова крайова задача, реле, виконавчий асинхронний мотор.

Підписано до друку 21.04.95р. Формат 60x84/16. Друк офс. Папір офс.
Умовн. фарб. видб. 1,16. Умовн. др. арк. 1,16. Обл. вид. арк. 1,0.
Тираж 100. Зам. 2359

Львівська обласна книжкова друкарня
290000 Львів вул. Стефаника, 11.

447991

AB 32.166

AB 32.166

Коды: 32.166.001 - 32.166.002

Дополнительно к указанным кодам вводится код 32.166.003 - "Средства измерений для измерения параметров электрических цепей".

Дополнительно к указанным кодам вводится код 32.166.004 - "Средства измерений для измерения параметров электрических цепей".

Коды: 32.166.001 - 32.166.002

Дополнительно к указанным кодам вводится код 32.166.003 - "Средства измерений для измерения параметров электрических цепей".

Дополнительно к указанным кодам вводится код 32.166.004 - "Средства измерений для измерения параметров электрических цепей".

Коды: 32.166.001 - 32.166.002

Дополнительно к указанным кодам вводится код 32.166.003 - "Средства измерений для измерения параметров электрических цепей".

Дополнительно к указанным кодам вводится код 32.166.004 - "Средства измерений для измерения параметров электрических цепей".