

УДК 518.61

О.М. Нечай

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра ПМ

ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕНТИЛЬНОГО ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

© Нечай О.М., 2002

Існує низка електричних схем, які здійснюють гальмування асинхронних двигунів за допомогою вентилів. При цьому особлива увага надається схемам із мінімальною кількістю вентилів. Тому є необхідність у вивченні і переосмисленні процесу динамічного гальмування для моделювання найкращих параметрів як процесу, так і самого асинхронного двигуна. Існуючі до цього числові методи дослідження не могли розв'язати цієї задачі, вдаючись до наближень та припущень, через високу штивність диференціальних рівнянь, які представляють модель роботи асинхронного двигуна. Запропонований числовий дробово-раціональний метод враховує властивості процесу при моделюванні.

There are exists of electric circuit which make braking of the anisochronous engine by means of valves. Special attention herewith is paid to the schemes with the minimal number of valves. That is why exists the necessity in the study and reanalysing of the process of the dynamic braking for the simulation of the best data parameters of this process and the anisochronous engines itself. The exiting digital methods of investigation couldn't solve the task. They used the probability and aproximality because of the high represent the model of the anisochronous engine work. The suggested digital takes into consideration the features of the process in the designing.

У [1, 2] запропоновано низку схем, які здійснюють гальмування асинхронних двигунів за допомогою вентилів, що включаються в тій чи іншій комбінації в обмотку статора гальмівного двигуна при збереженні його зв'язку з мережею (рис. 1). При цьому особлива увага приділяється схемам з мінімальною кількістю вентилів і, зокрема, – двовентильним.

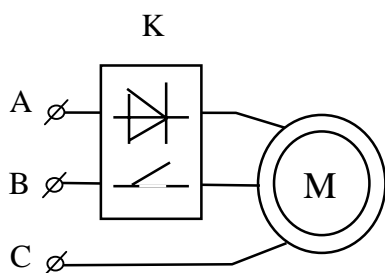


Рис. 1. Найпростіша схема динамічного гальмування двигуна

Простота та висока надійність двовентильних схем забезпечили їм помітне промислове застосування. Ширше застосування вентильного гальмування стримується відсутністю методів їх розрахунку, тому пошук адекватного методу на етапі розуміння динаміки гальмування двигунів є визначальним. Запропонований числовий метод розв'язання враховує властивості процесу.

Основна проблема у розв'язанні подібних задач полягає у великій штивності диференціальних рівнянь, які представляють модель асинхронного двигуна в режимі гальмування. В [3] штивність диференціальних рівнянь змінювалась введенням у фазу А статора додаткового опору R .

Проте, відомий метод Рунге – Кутта дає можливість розв'язати цю задачу тільки до значення декількох сотень Омів, а далі цьому методу непосильні розв'язки динамічного гальмування

через велику жорсткість системи. Тому з'явилась необхідність апробації нових числових дробово-раціональних методів розв'язання для дослідження динаміки цього процесу.

Аналіз режимів вентильного гальмування асинхронних двигунів можна виконати лише на основі диференціальних рівнянь, які враховують зміну насичення головного магнітного кола, і зміни частоти обертання.

В основу аналізу покладені диференціальні рівняння [5], які складаються з реальних фізичних величин напруг та струмів статора, що спрощує вираз вентильного ефекту, який зумовлює змінну у часі несиметрію кола статора

$$\begin{aligned} p\bar{\Psi}_S &= \bar{u}_S - r_S \cdot \bar{i}_S; & p\bar{\Psi}_R &= \omega_R \bar{\Psi}_R - r_R \cdot \bar{i}_R; \\ i_j (j = S, R) &= \alpha_j (\bar{\Psi}_j - \bar{\psi}_j) \end{aligned} \quad (1a, б, в)$$

де $\bar{\Psi}_S, \bar{u}_S, \bar{i}_S$ – тривимірні вектори повних потокозчеплень, напруг та струмів фаз статора:

$$\bar{h}_S (h = \Psi, u, i) = (h_{SA}, h_{SB}, h_{SC}); \quad (2)$$

$\bar{\Psi}_R, \bar{i}_R$ – двовимірні вектори перетворених повних потокозчеплень і струмів обмотки ротора

$$\bar{h}_R (h = \Psi, i) = (h_{RA}, h_{RB}); \quad (3)$$

α_S, α_R – величини, які обернені індуктивностям розсіювання обмоток статора і ротора

$$r_S = \text{diag}(r_{SA}, r_{SB}, r_{SC}); \quad r_R = \text{diag}(r, r) \quad (4)$$

– відповідно матриця частоти обертання ω і матриця опорів обмоток статора і ротора;

$$\bar{\Psi} = (\psi_A, \psi_B, \psi_C) \quad (5)$$

– тривимірний вектор робочих потокозчеплень.

Зважаючи, що сума компонент вектора $\bar{\Psi}$ дорівнює нулю, для однозначного визначення цього вектора достатньо зуміти обчислити дві його компоненти, наприклад, ψ_A і ψ_B . Для такого скороченого вектора $\psi = (\psi_A, \psi_B)$ отримано рівняння

$$p\bar{\psi} = \tilde{S} \cdot p\bar{\Psi}_S + Rp\bar{\Psi}_R; \quad (6)$$

При дослідженні несиметричних режимів у випадку відсутності нульового проводу статора необхідно задатись додатковою умовою рівності нулю струмів статора або ж повних потокозчеплень. Для цього достатньо записати рівняння (1a) у вигляді

$$p\bar{\Psi}_S = \bar{u}_S - r_S \cdot \bar{i}_S + \bar{V}, \quad (7)$$

де $\bar{V} = (v, v, v)$ – тривимірний вектор, елементи якого визначаються рівністю

$$v = \frac{1}{3} (r_{SA} \cdot i_{SA} + r_{SB} \cdot i_{SB} + r_{SC} \cdot i_{SC}). \quad (8)$$

Упорядковуючи всі попередні формули представлення фізичних процесів, нелінійні диференціальні рівняння електромагнетного стану асинхронного мотора запишемо в нормальній формі Коші

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_S & A_{SR} \\ A_{RS} & A_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_S \\ Y_R \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де субматриці цього рівняння мають вигляд

$$A_S = \begin{bmatrix} \alpha_S (1 - \alpha_S (T + b_A i_A)) & -\alpha_S^2 b_B i_A \\ -\alpha_S^2 b_B i_A & \alpha_S (1 - \alpha_S (T + b_A i_A)) \end{bmatrix};$$

$$Y_S = u_S - R_S i_S; \quad Y_R = \Omega \Psi_R - R_R i_R$$

$$A_{SR} = \begin{bmatrix} -\alpha_S \alpha_R (T + b_A i_A) & -\alpha_S \alpha_R b_B i_A \\ -\alpha_S \alpha_R b_B i_A & -\alpha_S \alpha_R (T + b_A i_A) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$A_{SR} = \begin{bmatrix} -\alpha_S \alpha_R (T + b_A i_A) & -\alpha_S \alpha_R b_B i_A \\ -\alpha_S \alpha_R b_A i_B & -\alpha_S \alpha_R (T + b_A i_A) \end{bmatrix};$$

$$A_{SR} = \begin{bmatrix} -\alpha_S \alpha_R (T + b_A i_A) & -\alpha_S \alpha_R b_B i_A \\ -\alpha_S \alpha_R b_B i_A & -\alpha_S \alpha_R (T + b_A i_A) \end{bmatrix},$$

причому

$$T = 1/(\tau + \alpha_R + \alpha_S); \quad R = 1/(\rho + \alpha_R + \alpha_S); \quad b = (R - T) / i_m^2; \\ b_A = \frac{2}{3} b(2i_A + i_B); \quad b_B = \frac{2}{3} b(i_A + 2i_B); \quad (11)$$

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

Значення $\rho = \frac{di_m}{dx_t} = \rho(i_m)$ і $\tau_m = \tau_m(i_m)$ визначаються кривою намагнічування машини.

U, Ψ, I – колонки напруг, повних поточкозчеплень і струмів

$$U = (u_s, 0)_t; \quad I = (i_s, i_r)_t; \quad \lambda_k (k = S, R; \lambda = u, i) = (\lambda_{SA}, \lambda_{SB})_t \quad (12)$$

Тут індекси S, R вказують на причетність до обмоток статора і ротора, а A, B – до їх фаз; R – матриця опорів, $R = \text{diag}(R_S, R_R)$; R_S, R_R – субматриці опорів статора і ротора

$$\Omega = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad R_S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2r_{SA} + r_{SC} & r_{SC} - r_{SB} \\ r_{SC} - r_{SA} & 2r_{SB} + r_{SC} \end{bmatrix}; \quad R_R = r_R, \quad (13)$$

де r_S, r_R – відповідно опори фаз статора і ротора. У симетричному випадку

$$r_{SA} = r_{SB} = r_{RC} = r_S.$$

Рівняння механічного руху записуємо у вигляді

$$\frac{d\omega}{dt} = \rho_0 (M_E - M_M) / J, \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega, \quad (14)$$

де ω – кутова швидкість обертання ротора; γ – кут повороту ротора; ρ_0 – кількість пар магнітних полюсів; J – момент інерції; M_M – момент опору; M_E – електромагнітний момент

$$M_E = \sqrt{3} p i (\Psi_{SA} i_{SB} + \Psi_{SB} i_{SA}). \quad (15)$$

Рівняння (9), (15) утворюють замкнену систему диференціальних рівнянь електро-механічної рівноваги машини. Для їх практичного застосування необхідно знати індуктивності розсіювання і активні опори обмоток гальмованого двигуна, а також мати криві, які отримують на основі характеристики намагнічування.

Відомо, що явні лінійні числові методи, незважаючи на їх просту структуру, непридатні для розв'язання штивних систем з огляду на їх обмежену область стійкості. Для дослідження штивних систем в основному використовуються лінійні неявні числові методи. Найширшого застосування набули неявні багатокрокові методи Гіра. Однак реалізація цих методів для розв'язання нелінійних систем ДР вимагає на кожному кроці інтегрування розв'язання нелінійних алгебраїчних систем, що породжує певні відомі обчислювальні проблеми. Крім цього для методів Гіра існує, так званий, “бар’єр Далавіста”, тобто не існує A – стійкого числового методу Гіра вище другого порядку точності. Вказані недоліки цих методів підтверджують актуальність побудови нових ефективніших методів розв'язання штивних систем диференціальних рівнянь, зокрема, дробово-раціональних однокрокових методів.

Застосуємо дробово-раціональні наближення для розв'язання задачі Коші

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \quad (16)$$

Використовують усереднення послідовності тейлорівських наближень розв'язань із певними ваговими коефіцієнтами ω_J

$$y_{nn}^{[p]} = \sum_{j=0}^p \omega_J \cdot T_{p-j,n}, \quad (17)$$

де $T_{p-j,n}$ – тейлорівське наближення $p-j$ -го порядку розв'язання задачі (1) у сітковому вузлі x_n

$$\omega_J = \frac{(-1)^J \alpha_J J_n^J h^J}{\sum_{i=0}^p (-1)^i \alpha_i h^i J_n^i}, \quad (18)$$

де J_n – значення матриці Якобі правої частини рівняння (1) у вузлі x_n ; α_i – відповідні скалярні параметри наближення обчислювальної стійкості, p – порядок наближення.

Використовуючи формули (17), (18), згідно з методикою визначення параметрів стійкості α_i , описаною у [4], побудовано дробово-раціональні наближення 1–4 порядків точності, які описуються формулами

$$\begin{aligned} y_{n+1}^{[1]} &= \frac{T_1 - \frac{h}{2} J_n T_0}{E - \frac{h}{2} J_n}; & y_{n+1}^{[2]} &= \frac{T_{2,n} - \frac{h}{2} J_n T_{1,n} + \frac{h^2}{12} J_n^2 T_{0,1}}{E - \frac{h}{2} J_n + \frac{h^2}{12} J_n^2}; \\ y_{n+1}^{[3]} &= \frac{T_{3,n} - \frac{h}{2} J_n T_{3,n} + \frac{h^2}{10} J_n^2 T_{1,n} - \frac{h^3}{120} J_n^3 T_{0,n}}{E - \frac{h}{2} J_n + \frac{h^2}{10} J_n^2 - \frac{h^3}{120} J_n^3}; \\ y_{n+1}^{[4]} &= \frac{T_{4,n} - \frac{h}{2} J_n T_{3,n} + \frac{3h^2}{28} J_n^2 T_{2,n} - \frac{h^3}{84} J_n^3 T_{1,n} + \frac{h^4}{1680} J_n^4 T_{0,n}}{E - \frac{h}{2} J_n + \frac{3h^2}{28} J_n^2 - \frac{h^3}{84} J_n^3 + \frac{h^4}{1680} J_n^4}; \end{aligned} \quad (19)$$

де $T_{k,\Pi}$ – часткова сума k -го порядку ряду Тейлора.

Для побудови числових методів дробово-раціонального вигляду на основі наближень (19) необхідно визначити спосіб апроксимації тейлорівських наближень $T_{1,n}$, $T_{2,n}$, $T_{3,n}$, $T_{4,n}$. Використовуючи відповідні відомі методи Рунге – Кутта [4], одержимо

$$\begin{aligned} k_1 &= h f(x_n, y_n), \quad k_2 = h f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}), & k_3 &= h f(x_n + h, y_n - k_1 + 2k_2), \\ k_4 &= h f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}), & k_5 &= h f(x_n + h, y_n + k_4). \end{aligned} \quad (20)$$

Тоді

$$T_{1n} = y_n + k_1, \quad T_{2n} = y_n + k_2, \quad T_{3n} = y_n + \frac{1}{6} (k_1 + 4k_2 + k_3), \quad T_{4n} = y_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_4 + k_5). \quad (21)$$

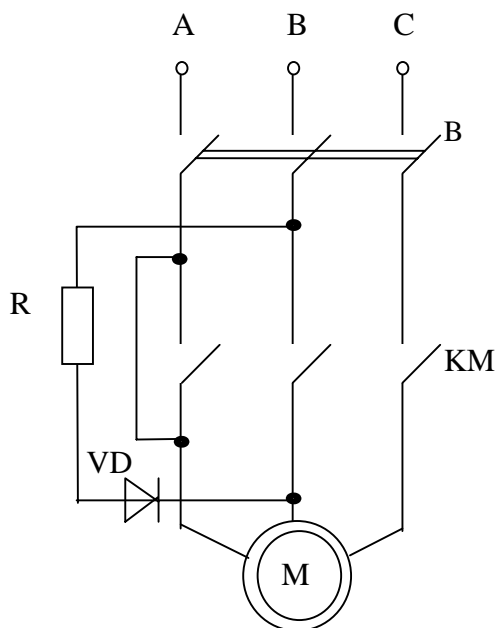


Рис. 2. Схема динамічного гальмування двигуна з одним вентилем

Значення J_n , які входять у (19) визначаємо безпосереднім диференціюванням правої частини системи по y або числовим диференціюванням. Побудовані числові методи використаємо для дослідження динамічного гальмування асинхронного двигуна (рис. 2).

Алгоритм інтегрування рівнянь (9), (15), реалізований на ЕОМ на базі створеної програми STIFF. Результати розрахунку гальмівних режимів за окремими схемами вентильного гальмування наведені нижче. Як об'єкт дослідження використовувався двигун А-12-52-8А при параметрах: $r_S = 1,273 \text{ Ом}$, $r_R = 1,31 \text{ Ом}$, $\alpha_S = 39 \text{ Гн}^{-1}$, $\alpha_R = 35,7 \text{ Гн}^{-1}$, $J = 64 \text{ кгм}^2$.

Вентильна дія діодів моделювалася змінним опором, який є складовою частиною компонент матриці (13). Модель (9) може спрацювати при недопустимо великому зворотному струмові, що призводить до порушення стійкості багатьох числових методів. Проте представлений метод дробово-

раціонального наближення дозволяє отримати розв'язок необхідної точності.

На рис. 3 і 4 зображено для порівняння криву кутової швидкості, яка характеризує режим вентильного гальмування асинхронного двигуна А-12-52-8А при опорі діода зворотному струмові $R_{\text{д звор}} = 800 \text{ кОм}$ і моменті навантаження $m_M = 25000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ і $30000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ відповідно.

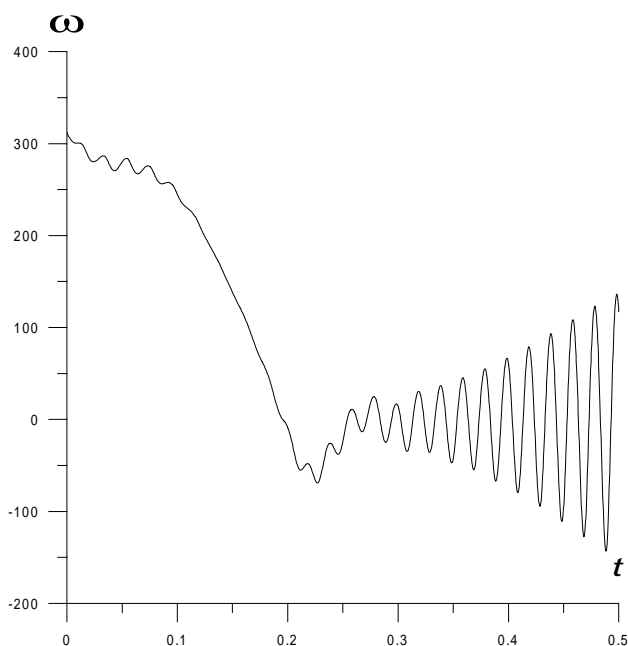


Рис. 3. Залежність $\omega = \omega(t)$ режиму вентильного гальмування асинхронного двигуна при $m_M = 25000 \text{ Н}\cdot\text{м}$

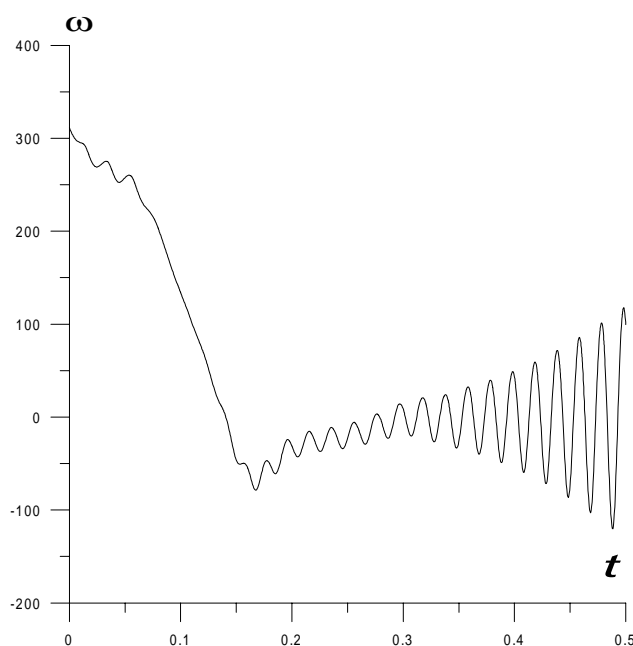


Рис. 4. Залежність $\omega = \omega(t)$ режиму вентильного гальмування асинхронного двигуна при $m_M = 30000 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Вентильне гальмування асинхронних двигунів відрізняється простотою і надійністю. Для його здійснення не потрібно додаткових джерел живлення чи ємностей. Воно ефективніше від гальмування проти включення, вигідно відрізняється від нього відсутністю давальника нульової швидкості, оскільки розгін двигуна у протилежному напрямку тут відсутній. Так, час гальмування до повної зупинки двигуна за схемою рис. 2 в два рази менший від часу гальмування в режимі противмикання.

Розглянутий числовий метод дозволяє з достатньою точністю розрахувати основні параметри гальмівного процесу і на основі отриманих результатів вибрати в кожному конкретному випадку найраціональнішу схему гальмування, а також визначити оптимальний опір додаткових резисторів.

1. Каплан Н.А., Лapidус А.И. Безвибрационное торможение асинхронных двигателей по несимметричным схемам с вентилями // *Электротехника*. – 1972. – № 11. 2. Mc Genis. A novel braking scheme for induction machines // *@IEEE Trans. Power Appar and Syst@*. – 1971. – № 90; № 6. 3. Слоновський Р.В., Чабан В.Й., Нечай О.М. Порівняльний аналіз методів Рунге-Кутта і дробово-раціонального наближення розв'язку диференціальних рівнянь асинхронного мотора. – Львів, 1990. 4. Слоновський Р.В., Яремко Т.М. Чисельні методи розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь. – Львів, 1990. 5. Чабан В.И. Методи аналізу електромеханічних систем. – Львів, 1985.

УДК 658.283.1:613.6

Л.О. Никонець, А.А. Маліновський, В.І. Комаров

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедри ЕС, ЕПМС, ОП

НЕОБОРОТНІ ЯВИЩА В ТІЛІ ЛЮДИНИ У ВИПАДКУ ДІЇ НА НЬОГО ЗМІННОЇ НАПРУГИ

© Никонець Л.О., Маліновський А.А., Комаров В.І., 2002

Визначені умови виникнення травмуючих необоротних явищ в тілі людини під дією змінної напруги. Запропонована методика розрахунку діючих і миттєвих значень струму крізь тіло людини під час виникнення і розвитку необоротних явищ.

Conditions of appearance traumatic irreversible phenomena in case of an alternating voltage action are defined. The methodology of calculation of the effective and instantaneous current values through the human body during an appearance and a development of the irreversible phenomena is proposed.

Дотримання нормативних вимог з електробезпеки повинно гарантувати людині не лише життя, але й захист від отримання електротравм, що супроводжуються необоротними явищами в організмі людини. Дослідження умов виникнення та розвитку електротравм має важливе значення для удосконалення нормативної бази електробезпеки і тестування нових схемно-технічних вирішень електроустановок.

Експериментальні дослідження показують, що характер зміни струму крізь тіло i_h в часі і його дія на організм за незмінності значення прикладеної змінної напруги для однакового шляху струму в тілі можуть бути різними залежно від площі поверхні дотику