

## СИМУЛЯЦІЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ АСИНХРОННОГО МОТОРА, ЩО ЖИВИТЬСЯ ЧЕРЕЗ КАБЕЛЬ

Чабан В., д.т.н., проф., Ковівчак Я., к.т.н., Кашка лов В., к.т.н., Чабан А., к.т.н  
 Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна,  
 E-mail: vipurtov@polynet.lviv.ua.

*Запропоновано метод розрахунку комутаційних перехідних процесів насиченого асинхронного мотора, що живиться через кабель. Диференціальні рівняння системи записуються в нормальній формі Коші. Результати комп'ютерної симуляції служать для оптимізації захисту мотора від комутаційних перенапруг за допомогою конденсаторних батарей. Подаються результати розрахунку.*

*Предложен метод расчета коммутационных переходных процессов насыщенного асинхронного двигателя, питаемого через кабель. Дифференциальные уравнения системы записываются в нормальной форме Коши. Результаты расчета на ЭВМ назначаются для оптимизации защиты двигателя от коммутационных перенапряжений с помощью конденсаторных батарей. Приводятся результаты расчета.*

### ВСТУП

Асинхронний мотор - основний споживач електромагнетної енергії в світі. Більшість електроприводів рідко обходяться без цього типу машин. Тому задача математичного моделювання перехідних і усталених процесів, діагностики асинхронних моторів належить до важливих теоретичних проблем електромеханіки. У даній роботі досліджується одна із актуальних задач асинхронного приводу – математичне моделювання перенапруг асинхронного мотора, що живиться через довгий кабель, при знеструмленні обмотки статора після вимикання джерела живлення. Такі перенапруги спричиняють часті пошкодження обмотки статора, що врешті-решт значно скорочує час служби мотора, завдає значних матеріальних збитків його користувачеві. Симуляція низки відповідних перехідних процесів уможливорює оптимізувати систему захисту мотора, основним компонентом якої згідно з нашим патентом [1] є конденсаторні батареї.

На практиці в таких випадках звертаються до експерименту. Але експеримент може бути порівняно коштовним, а в багатьох випадках унеможливленій у практичній реалізації. Математична модель бере на себе функції вчителя і практичного порадики.

Досконалу математичну модель асинхронної машини можна побудувати лише на підставі теорії електромагнетного поля. Але такі моделі є надто складні й використати їх у практичних розрахунках поки що не вдається. Не тільки із-за непомірного об'єму обчислень, але перш за все із-за цілої низки нерозв'язаних теоретичних проблем електродинаміки в дискретному просторі. Тому ми обмежимося розглядом лише прийнятої *колової математичної моделі*. Вона будується на підставі методів теорії електромагнетних кіл [2], а не електричних, як це загальноприйнято. Така модель має низку важливих переваг над традиційною. Головна з них – запис диференціальних рівнянь електромеханічного стану в нормальній формі Коші. Відсутність операції обернення матриці коефіцієнтів значно спрощує обчислювальний процес, підвищує точність і відкриває реальні можливості аналізу в тривалих і надтривалих перехідних процесів.

### 1. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Диференціальні рівняння асинхронного мотора запишемо у вигляді [1]

$$\begin{aligned} \frac{di_S}{dt} &= A_S(u_S - R_S i_S) + A_{SR}(\Omega \Psi_R - r_R i_R); \\ \frac{di_R}{dt} &= A_{RS}(u_S - R_S i_S) + A_R(\Omega \Psi_R - r_R i_R). \end{aligned} \quad (1)$$

Тут  $i_S = (i_{SA}, i_{SB})_t$ ;  $i_R = (i_{RA}, i_{RB})_t$  – колонки фазних струмів статора й перетворених струмів ротора;  $A_S, A_{SR}, A_{RS}, A_R$  – матриці коефіцієнтів:

$$A_S = \alpha_S(1 - \alpha_S G); \quad A_{SR} = A_{RS} = -\alpha_S \alpha_R G; \quad A_R = \alpha_R(1 - \alpha_R G), \quad (2)$$

де  $G$  – матриця

$$G = \begin{bmatrix} T + b_A i_A & b_B i_A \\ b_A i_B & T + b_B i_B \end{bmatrix}, \quad (3)$$

причому

$$\begin{aligned} b_A &= b(2i_A + i_B); \quad b_B = b(i_A + 2i_B); \quad b = \frac{2R - T}{3i_m^2}; \\ R &= \frac{1}{\alpha_S + \alpha_R + \rho}; \quad T = \frac{1}{\alpha_S + \alpha_R + \tau}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут  $\tau, \rho$  – обернені статична й диференціальна індуктивність, їх знаходимо за характеристикою намагнетчування (холостого стану) машини  $\Psi_m = \Psi_m(i_m)$  як:

$$\tau = \left[ \frac{\Psi_m(i_m)}{i_m} \right]^{-1}; \quad \rho = \left[ \frac{d\Psi_m(i_m)}{di_m} \right]^{-1}, \quad (5)$$

де  $i_m$  – модуль просторового вектора намагнетчувальних струмів

$$i_m = 2\sqrt{(i_A^2 + i_A i_B + i_B^2)/3}; \quad i_A = i_{SA} + i_{RA}; \quad i_B = i_{SB} + i_{RB}. \quad (6)$$

При відсутності насичення характеристика намагнетчування вироджується в пряму  $i_m = \alpha_m \Psi_m$ , де  $\alpha_m$  – обернена основна індуктивність машини, матриця (3) вироджується згідно з (4), (5), (6) у скаляр

$$G = \frac{1}{\alpha_S + \alpha_R + \alpha_m}, \quad (7)$$

що значно спрощує рівняння (1). У такому разі ми отримуємо найпростішу з усіх відомих математичну модель асинхронного мотора. Треба сказати, що на-

сичення в асинхронних моторах враховується рідко. Воно стосується таких станів як динамічне, конденсаторне, вентиляне гальмування, перенапруги тощо.  $R_s, R_r$  – матриці опорів

$$R_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2r_{SA} + r_{SC} & r_{SC} - r_{SB} \\ r_{SC} - r_{SA} & 2r_{SB} + r_{SC} \end{bmatrix}; \quad R_r = r_r, \quad (8)$$

причому  $r_{SA}, r_{SB}, r_{SC}$  – опори фаз статора;  $r_r$  – приведений опір лобових частин обмотки ротора. Матриця  $R_s$  одержана з урахуванням напруги зміщення нейтралей джерела й обмотки статора. За умови  $r_{SA} = r_{SB} = r_{SC} = r_s$  матриця  $R_s$  вироджується в скаляр:  $R_s = r_s$  подібно до випадку симетричного ротора.

$\Omega$  = матриця кутової швидкості

$$\Omega = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Колонку повних потокозчеплень обмотки ротора  $\Psi_R = (\Psi_{RA}, \Psi_{RB})_t$  знаходимо згідно з (5)-(6)

$$\Psi_{Rj} = \frac{1}{\tau} i_j + \frac{1}{\alpha_R} i_{Rj}, \quad j = A, B. \quad (10)$$

Рівняння електромагнетного стану слід доповнити рівняннями механічного стану, щоб обчислити кутову швидкість  $\omega$ , що фігурує в (9). Це рівняння одержане на підставі рівняння Лагранжа другого роду, нехтуючи штивністю й дисипацією тіла ротора,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0}{J} (M_E - M(\omega)), \quad (11)$$

де  $M(\omega)$  – механічний момент;  $p_0$  – число пар магнетних полюсів;  $J$  – момент інерції ротора;  $M_E$  – електромагнетний момент

$$M_E = \sqrt{3} p_0 (i_{RA} i_{SB} - i_{RB} i_{SA}) / \tau. \quad (12)$$

Формулу (12) одержано, виходячи з запасу електричної енергії в контурах машини.

Система диференціальних рівнянь (1), (11) становить математичну модель асинхронного мотора. Ця модель призначається для аналізу перехідних і установившихся процесів.

На рис. 1 показано заступну схему системи живлення мотора. На підставі методу трансфігурації усі конденсатори можна звести до еквівалентної зірки, фазну ємність якої позначимо  $C = C_0 + 3(C_C + C_B)$ .

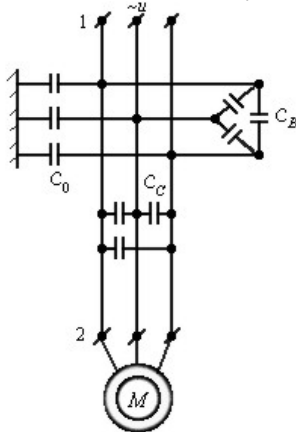


Рис. 1. Заступна схема системи живлення мотора

Диференціальні рівняння еквівалентної батареї конденсаторів запишемо так

$$\frac{du_S}{dt} = C^{-1} i_S, \quad (13)$$

оскільки напруга конденсаторної батареї дорівнює напрузі статора мотора. Резистивно-індуктивні параметри кабеля зазвичай включаються в резистивний опір та індуктивність розсіяння обмотки статора мотора.

Для практичного користування запропонованою нами необхідно знати такі вхідні дані:

- $r_s, r_r$  – опори обмоток статора й ротора;
- $\alpha_s, \alpha_r$  – обернені індуктивності дисипації обмоток статора й ротора;
- характеристику холостого стану  $\psi_m = \psi_m(i_m)$ , а при неврахуванні насичення головного магнетного кола – обернену основну індуктивність машини  $\alpha_m$ ;
- $p_0, J$  – число пар магнетних полюсів і момент інерції ротора;
- $C$  – еквівалентну ємність фази;
- $r_k, L_k$  – опір і індуктивність кабеля, якими з достатньою точністю для практики інколи можна знехтувати.

Вхідними сигналами є:

- $u_{SA} = U_m \sin(\omega t + \varphi), u_{SB} = U_m \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ)$  – фазні напруги живлення;
- $M = M(\omega)$  – механічний момент на валу.

Вихідними величинами є:

- $i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} = -i_{SA} - i_{SB}$  – фазні струми статора;
- напруги статора (мережі або конденсаторної батареї);
- $\omega, M_E$  – кутова швидкість ротора та електромагнетний момент.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ СИМУЛЯЦІЇ

Результати симуляції виконані для вхідних даних, що приблизно відповідають реальним експлуатаційним умовам асинхронного мотора А12-52-8А ( $P_H = 320$  кВт,  $U_H = 6$  кВ,  $I_H = 39$  А,  $\omega_H = 740$  об/хв):

$r_s = 1,27$  Ом,  $r_r = 1,31$  Ом,  $\alpha_s = 38,9$  Гн<sup>-1</sup>,  $\alpha_r = 35,7$  Гн<sup>-1</sup>; характеристика холостого стану  $\psi_m = \psi_m(i_m)$ :

$$\psi_m = \begin{cases} 9i_m, & \text{if } i_m \leq 11; \\ 9 + 0,818(i_m - 11) + 0,0064(i_m - 11)^2 + \\ + 0,000147(i_m - 11)^3, & \text{if } 11 < i_m < 40; \\ 0,2375 + 13i_m, & \text{if } 40 \leq i_m; \end{cases}$$

$p_0 = 4, J = 64,5$  Нм<sup>2</sup>;  $C = 0,00001$  Ф;  $r_k = L_k = 0$ . Ємність завідомо завищена, щоб показати наочніше її ефективність.

Вхідні сигнали:

$$u_{SA} = 4900 \sin(314t), u_{SB} = 4900 \sin(314t - 120^\circ);$$

$$M = M(\omega) = 2900 \text{ Нм.}$$

Розраховувався перехідний процес у системі за схемою рис. 1, що відповідав запуску мотора з наступним вимиканням джерела мережі.

На рис. 2 і 3 показані результати комп'ютерної симуляції перехідного процесу асинхронного мотора потужністю 320 кВт, 750 об/хв, що живиться через кабель від мережі 6000 В. Процес супроводжується двома комутаціями – вмикання мотора в мережу й вимикання з мережі на 2 с перехідного процесу.

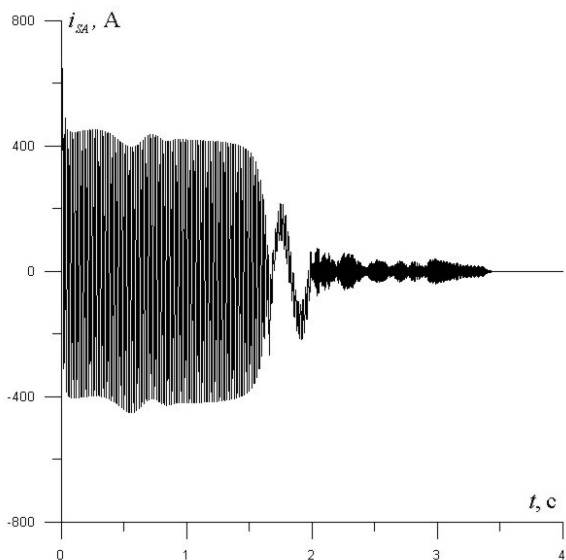


Рис. 2. Струм фази  $A$  статора в стані запуску, нормальній роботі і гальмуванні при вимкненні в момент 2 с джерела напруги мережі.

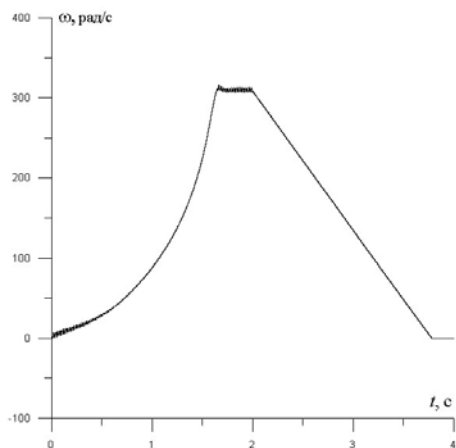


Рис. 3. Кутова швидкість у перехідному процесі, що відповідає процесові, показаному на рис. 2.

Найбільший практичний інтерес мають криві, показана на рис. 4 - 6, що стосується перенапруги на обмотці статора. При відсутності батареї конденсаторів перенапряга може досягати багатократного значення. Варіюючи ємністю батареї конденсаторів  $C_B$ , можна цю перенапрягу зменшити до прийняттого значення.

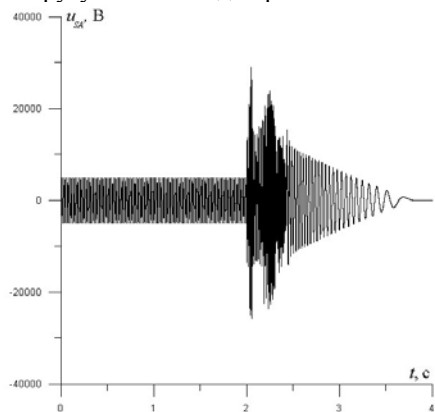


Рис. 4. Напряга фази  $A$  статора в перехідному процесі, що відповідає процесові, показаному на рис. 2,  $C = 0,2$  мкФ (ємність кабеля).

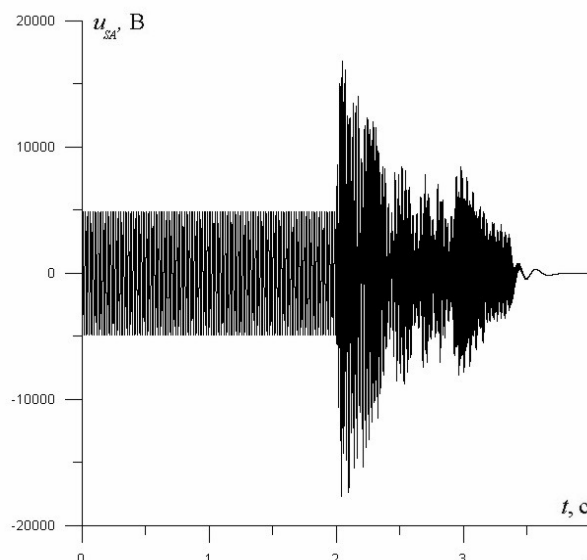


Рис. 5. Напряга фази  $A$  статора в перехідному процесі, що відповідає процесові, показаному на рис. 2,  $C = 1$  мкФ.

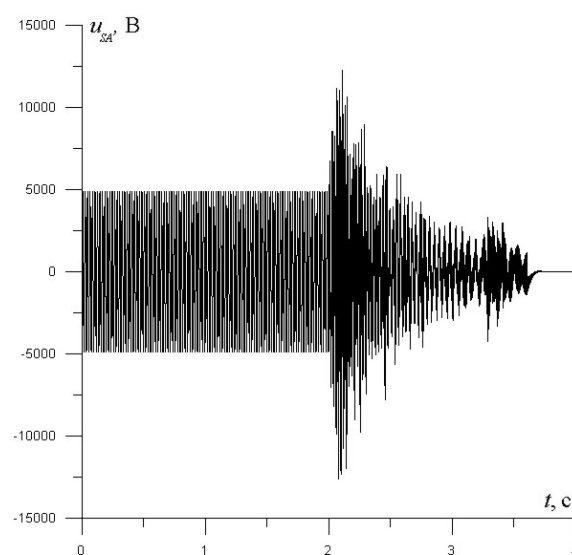


Рис. 6. Напряга фази  $A$  статора в перехідному процесі, що відповідає процесові, показаному на рис. 2,  $C = 10$  мкФ.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1]. Кашкалов В.І. Пристрій обмеження перенапруги на струмоприймачі змінної напруги (Патент на винахід № 38557А, Н02Н7/00, Н02Н7/09). – Бюл. № 4 від 15. 05. 2001 р.
- [2] Чабан В. Математичне моделювання електромеханічних процесів. – Львів, 1997, 344 с.

Надійшла 25.02.03