

АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ АСИНХРОННОГО МОТОРА ПІД ЧАС ВИМКНЕННЯ З МЕРЕЖІ

© Чабан А.В., 2006

Розроблено теоретичний апарат аналізу комутаційних перенапруг на виводах обмоток статора асинхронного мотора під час вимкнення з мережі. Розрахунок комутаційних процесів здійснювали на прикладі математичної моделі мотора зображеній у фазних координатах струмів. Подані результати комп'ютерної симуляції.

In the paper is worked up theoretical base of analyze of switching surges of induction motor stator winding in switching off from system. The computation of switch processes are realized on example of differential equations of mathematical model of motor which are wrote down in phase coordinate system.

Постановка проблеми. Важливим моментом забезпечення надійної роботи електроприводів є аналіз комутаційних процесів в електромеханічних пристроях. Ця проблема, зокрема стосується вимкнення з мережі асинхронних моторів. На сьогодні в електротехніці все більше і більше застосовуються вакуумні та елегазові вимикачі нових типів, які характеризуються високою швидкодією (до 10 мс). У вимикачі відбувається, так званий, “зріз струму”. За таких умов можна вважати, що вимкнення мотора здійснюється не в момент переходу функції струму через нуль, а в довільний момент часу. Струм статора практично різко змінюється до нуля (коли погасне дуга), а це означає, що в роторному колі теж відбудеться різка зміна струму (на відміну від статорного кола стрибок струму в роторному колі буде до якогось певного значення). В електротехніці методика визначення таких стрибків називається розрахунком початкових умов, які здійснюються на підставі законів комутації, що впливають з фундаментальних законів електродинаміки. Для аналізу комутаційних перенапруг використовується математична модель асинхронного мотора, побудована на підставі теорії нелінійних електромагнітних кіл. Зображення математичної моделі мотора у фазних координатах струмів дає змогу рахування будь-яких видів несиметрії як з боку статора, так і з боку ротора.

З погляду електромеханіки задача є досить актуальна, адже перенапруги на виводах статора моторів призводять до значних пошкоджень ізоляційних матеріалів машини, і, як наслідок, до виходу останньої з ладу, тобто до зменшення надійності роботи приводного мотора. Наша співпраця із спеціалістами заводу АЗОВМАШ показала, що запропонований підхід до вищевказаних проблем з достатньою точністю відтворює реальні процеси в електромашинних системах, а результати комп'ютерної симуляції, запропонованих нами математичних моделей, відтворюють реальну фізичну картину.

Аналіз результатів останніх досліджень. Комутаційні перенапруги в асинхронних приводах досліджували за умови живлення мотора через довгий кабель [2]. Таку задачу розв'язано і розроблено методику боротьби з комутаційними перенапругами. Крім того, досить часто в літературі комутаційні апарати моделюють за допомогою $R-L-C$ ланки, а також вводять в електричний контур нелінійний елемент, зображений статичною вольт-амперною характеристикою електричної дуги, яка горить між контактами вимикача [4]. Такий підхід є прийнятним для практичних застосувань, але виникає проблема обчислення реальних параметрів цієї ланки, а також точної вольт-амперної характеристики нелінійного елемента. Тому такі підходи мають певні недоліки.

Задачі досліджень. Метою роботи є розроблення теоретичних засад, на основі яких можливі обчислення комутаційних перенапруг асинхронного мотора під час вимкнення його з мережі,

побудова алгоритму обчислення цих перенапруг, а також підтвердити запропоновані теоретичні розробки результатами комп'ютерної симуляції та порівняти їх з експериментально знятими даними.

Виклад основного матеріалу. Подамо рівняння електромагнітного контуру статора та ротора для асинхронного мотора [1]

$$\frac{d\Psi_S}{dt} = u_S - R_S i_S ; \quad \frac{d\Psi_R}{dt} = -R_R i_R ; \quad \Psi_S = \alpha_S^{-1} i_S + \psi_S ; \quad \Psi_R = \alpha_R^{-1} i_R + \psi_R , \quad (1)$$

де Ψ_S, Ψ_R – вектор-стовпці повних потокозчеплень статора й ротора, відповідно; ψ_S, ψ_R – вектор-стовпці основних потокозчеплень статора й ротора, відповідно; $\alpha_S = L_{\sigma S}^{-1}, \alpha_R = L_{\sigma R}^{-1}$ – матриці обернених індуктивностей дисипації обмоток статора й ротора, відповідно; i_S, i_R – вектор-стовпці струмів статора й ротора, відповідно; u_S – вектор-стовпець фазних напруг статора.

З рівняння (1) отримаємо

$$i_S = \alpha_S (\Psi_S - \psi) ; \quad i_R = \alpha_R (\Psi_R - \Pi^{-1} \psi) , \quad \text{де } \psi = \psi_S . \quad (2)$$

Подамо математичну модель асинхронного мотора у фазних координатах струмів [1]

$$\frac{di_S}{dt} = A_S (u_S - R_S i_S) + A_{SR} \Pi (-\Omega \Psi_R - R_R i_R) ; \quad (3)$$

$$\frac{di_R}{dt} = \Pi^{-1} A_{RS} (u_S - R_S i_S) + \Pi^{-1} A_R \Pi (-\Omega \Psi_R - R_R i_R) + \Omega i_R ; \quad (4)$$

$$A_S = \alpha_S (1 - \alpha_S G) ; \quad A_{SR} = A_{RS} = \alpha_S \alpha_R G ; \quad A_R = \alpha_R (1 - \alpha_R G) ; \quad (5)$$

$$\psi = \Pi \psi_R = \tau (i_S + \Pi i_R) ; \quad \psi_R = \Pi^{-1} \psi_S = \tau (\Pi^{-1} i_S + i_R) ; \quad (6)$$

$$\Omega = \Pi \frac{d\Pi^{-1}}{dt} \equiv -\Pi^{-1} \frac{d\Pi}{dt} = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} ; \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_A & i_B \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_{SA} & i_{SB} \end{bmatrix}^T + \Pi \begin{bmatrix} i_{RA} & i_{RB} \end{bmatrix}^T ; \quad R = 1/(\alpha_S + \alpha_R + \tau) ; \quad G = \begin{bmatrix} T + b_A i_A & b_B i_A \\ b_A i_B & T + b_B i_B \end{bmatrix} ; \quad (8)$$

$$T = 1/(\alpha_S + \alpha_R + \rho) , \quad b = \frac{2}{3} \frac{R - T}{i_m^2} , \quad b_A = b(2i_A + i_B) , \quad b_B = b(2i_B + i_A) ; \quad (9)$$

$$\tau = \left(\frac{\Psi_m}{i_m} \right)^{-1} ; \quad \rho = \left(\frac{\partial \Psi_m}{\partial i_m} \right)^{-1} ; \quad i_m = 2\sqrt{(i_A^2 + i_A i_B + i_B^2)/3} ; \quad L_m = \tau^{-1} ; \quad (10)$$

$$\Pi = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin(\gamma + 2\pi/3) & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & -\sin(\gamma - 2\pi/3) \end{bmatrix} ; \quad \Pi^{-1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -\sin(\gamma - 2\pi/3) & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \sin(\gamma + 2\pi/3) \end{bmatrix} ; \quad (11)$$

$$M_E = \sqrt{3} p_0 (i_{RA}^{\Pi} i_{SB}^{\Pi} - i_{RB}^{\Pi} i_{SA}^{\Pi}) / \tau , \quad \text{де } \begin{bmatrix} i_{RA}^{\Pi} & i_{RB}^{\Pi} \end{bmatrix}^T = \Pi \begin{bmatrix} i_{RA} & i_{RB} \end{bmatrix}^T , \quad (12)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0}{J} (M_E - M(\omega)) ; \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega(t) ; \quad \gamma(0) = \gamma_0 , \quad (13)$$

де p_0 – кількість пар полюсів мотора; M_E – електромагнітний момент мотора; ω – електрична швидкість мотора; γ – кут повороту уявної фази A ротора щодо фази A статора; γ_0 – початковий кут повороту ротора (для мотора з КЗ ротором $\gamma_0 \equiv 0$); $M(\omega)$ – момент навантаження, прикладений до ротора мотора; L_m – індуктивність намагнічення мотора; A, B – індекси приналежності до відповідних фаз.

Запишемо закони комутації для електромагнітних кіл

$$\Psi(-0) = \Psi(+0) ; \quad q_C(-0) = q_C(+0) . \quad (14)$$

Тобто, це означає, що повне потокозчеплення електромагнітного контуру не може змінюватись стрибком, а також заряд на конденсаторі теж не може змінюватись стрибком.

Зобразимо повні потокозчеплення ротора асинхронного мотора до комутації, на основі (1), (6), (14)

$$\Psi_R(-0) = L_{\sigma R} i_R(-0) + \psi_R(-0) ; \quad \Psi_R(+0) = L_{\sigma R} i_R(+0) + \psi_R(+0) ; \quad (15)$$

$$\psi_R(-0) = L_m (\Pi^{-1} i_S(-0) + i_R(-0)) ; \quad \psi_R(+0) = L_m (\Pi^{-1} i_S(+0) + i_R(+0)) \quad (16)$$

зауважимо, що після комутації

$$i_S(+0) \equiv 0 . \quad (17)$$

Тоді, розв'язавши сумісно (15), (16) за умови (14), отримаємо значення струму ротора після комутації, тобто початкові умови комутації

$$i_R(+0) = i_R(-0) + \frac{L_m}{L_m + L_{\sigma R}} \Pi^{-1} i_S(-0) . \quad (18)$$

Запишемо рівняння електромагнітного контуру (1) для статора після комутації, за умови (6), (17)

$$\frac{d\Psi_S}{dt} = u ; \quad \Psi_S = \psi . \quad (19)$$

Розв'яжемо сумісно (1), (2) за умови (6), (19), отримаємо

$$L_{\sigma R} \frac{di_R}{dt} + \frac{d\psi_R}{dt} = L_{\sigma R} \frac{di_R}{dt} + \frac{d\Pi^{-1}}{dt} \Pi \psi_R + \Pi^{-1} u = -r_R i_R \quad (20)$$

звідки

$$u = -L_{\sigma R} \Pi \frac{di_R}{dt} - \Pi \frac{d\Pi^{-1}}{dt} \Pi \psi_R - r_R \Pi i_R , \quad (21)$$

де на основі (4), (17)

$$\frac{di_R}{dt} = \Pi^{-1} A_R \Pi (-\Omega \Psi_R - R_R i_R) + \Omega i_R \quad (22)$$

Розв'язуючи сумісно (21), (22) за умови (10), отримаємо остаточно вираз для знаходження вектор-стовпця фазної напруги на виводах статора після відімкнення його з мережі

$$u = -L_{\sigma R} \left(\Omega i_R - A_R \Pi \left(\Omega \left(L_{\sigma R} i_R + \frac{i_R}{\tau} \right) - R_R i_R \right) \right) - \Omega \Pi \frac{i_R}{\tau} - r_R \Pi i_R . \quad (23)$$

Результати комп'ютерної симуляції. Комп'ютерну симуляцію здійснювали на прикладі асинхронного електропривода з активним моментом на валу ротора. Електропривід пускали в хід. Тоді за досягнення усталеного процесу, здійснювали комутацію: обмотку статора асинхронного мотора відмикали від мережі. Параметри електропривода такі: асинхронний мотор з КЗ ротором типу А-12-58-8А з паспортними даними: $U_H = 6$ кВ, $I_H = 39$ А, $P_H = 380$ кВт, $p_0 = 4$. Момент навантаження на валу ротора був таким: $M(\omega) = 4000$ Нм. Інтегрування рівнянь стану електропривода здійснювалось явним методом Рунге-Кутта четвертого порядку за допомогою прикладної програми Visual FORTRAN. Результати комп'ютерної симуляції наочно відтворені на рисунках .

На рис. 1 показано перехідний процес уявної фази А ротора. У теорії електричних машин приймають допущення, щодо еквівалентності багатofазної системи струмів ротора (кількість фаз дорівнює кількості стрижнів клітки ротора) симетричною трифазною системою [5]. Таке допущення дає змогу істотно зменшити кількість рівнянь електромагнітного стану, практично не зменшивши рівня адекватності математичної моделі машини. Як видно з рисунка, усталений процес настав через $t = 1, 2$ с після пуску, про що свідчить значення частоти струму ротора (вона буде така

сама i в реальному стрижні клітки ротора). В усталеному процесі ця частота дорівнює майже один герц. У момент комутації $t = 2,5$ с різко зріс струм у роторі, що впливає із закону збереження енергії, а отже, і з законів комутації. І майже через п'ять секунд струм в роторі почав дорівнювати нулю.

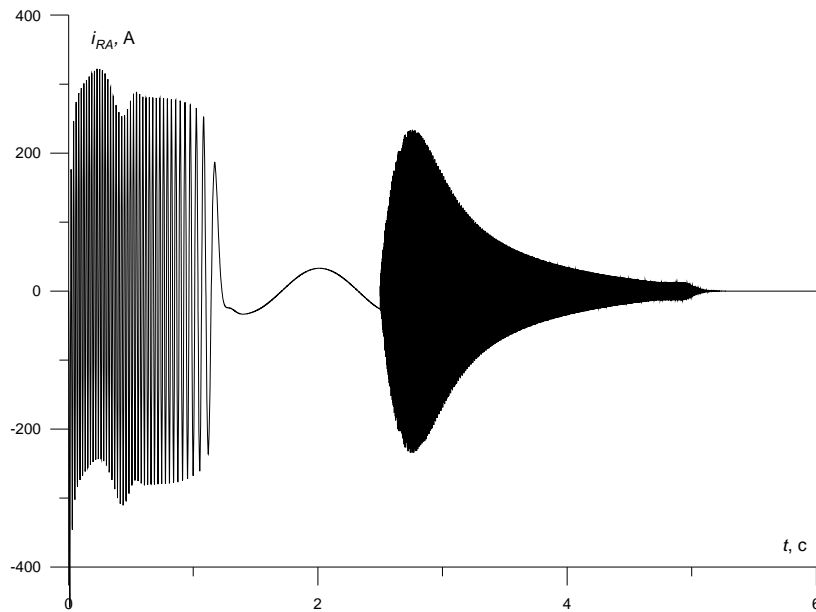


Рис. 1. Струм уявної фази ротора в перехідному процесі

На рис. 2 показано напругу фази A статора як функцію часу. Процес практично відповідає реальному. На заводі АЗОВМАШ експериментальними методами було заміряно фазну напругу на виводах статора після вимкнення мотора з мережі. Ці дані показали, що перенапруга статора досягала п'яти-, шестикратного збільшення. На вказаному рисунку перенапруга сягає більше п'ятикратного збільшення, що, очевидно залежить від початкових умов комутації. Зауважимо, що у випадку використання асинхронних моторів з фазовим ротором, початкові умови залежатимуть від кута повороту фази A ротора (не уявної, а реальної) щодо фази A статора в момент пуску мотора, тобто $\gamma_0 \neq 0$.

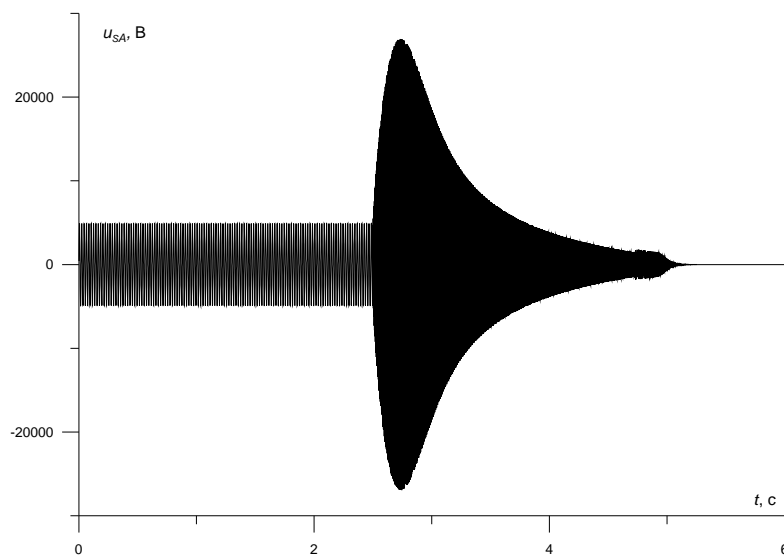


Рис. 2. Напруга фази статора мотора в перехідному процесі

Задача щодо зменшення перенапруги на виводах статора асинхронного мотора під час вимкнення з мережі розв'язана повністю і результати комп'ютерної симуляції впроваджені у виробництво на цьому ж заводі. Детально це описано в [2, 3].

На рис. 3 показано перехідний процес електричної кутової швидкості мотора (для отримання реальної швидкості необхідно одержані результати поділити на кількість пар полюсів). У момент комутації електромагнітний момент мотора почав дорівнювати нулю і привід під дією активного моменту зупинився. Зауважимо, що струм в обмотці ротора мотора почав дорівнювати нулю, коли $t = 5$ с, тоді як електропривід продовжував обертатись (до $t = 5,6$ с), див. рис. 3. Отже, напруга на виводах статора почала дорівнювати нулю, коли розмагнітився магнітний контур ротор-статор.

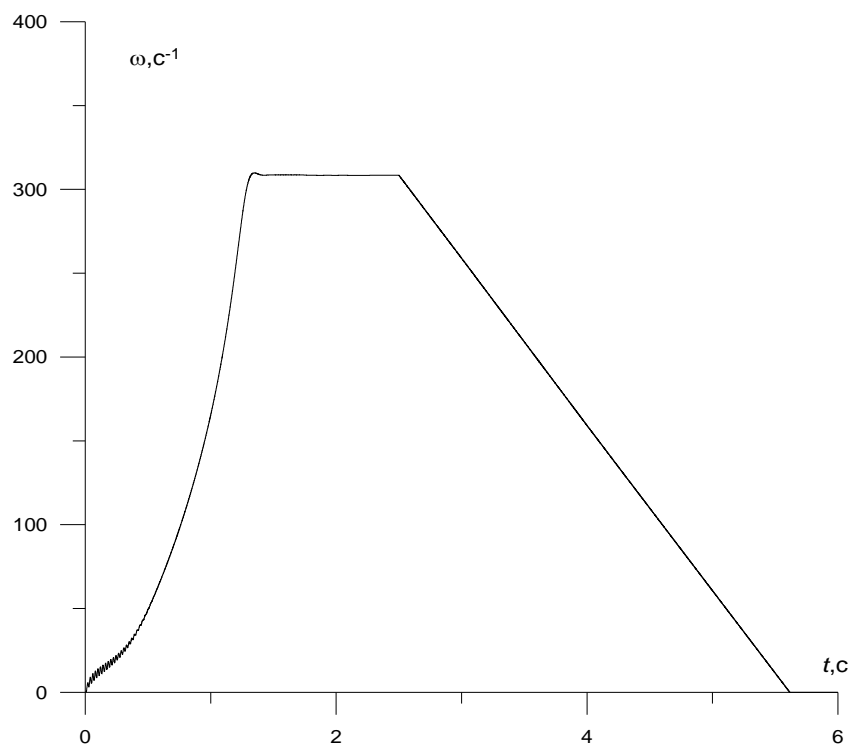


Рис. 3. Електрична швидкість мотора в перехідному процесі

Висновки. Дослідження перенапруг на виводах статора асинхронного мотора під час відімкнення його від мережі необхідно здійснювати винятково методами математичного моделювання. Методика розрахунку початкових умов комутації базується на аналізі високо-адекватних математичних моделей асинхронних моторів, зображених рівняннями нелінійних електромагнітних кіл, а у разі застосування глибокопазних моторів та моторів з подвійною білячою кліткою і рівняннями електромагнітного поля.

1. Чабан А. Особливості Ψ - та A -моделей асинхронного мотора у фазних координатах // Електротехніка і електромеханіка. – 2005'4. – С. 37–39. 2. Чабан В., Ковівчак Я., Кашкалов В., Чабан А. Симуляція комутаційних перенапруг асинхронного мотора, що живиться через кабель // Електротехніка й електромеханіка. – 2003'2. – С. 58–60. 3. Чабан А. Симуляція комутаційних перенапруг глибокопазного асинхронного мотора, що живиться через кабель // Електротехніка й електромеханіка. – 2004'3. – С. 61–64., 4. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с. 5. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. – М.: Высшая школа, 1975. – 320 с.