

DOI:

УДК 62-83:681.513.5

О.В. Ключев¹, к.т.н., доцент, kluev2006@ukr.net

О.В. Садовой², д.т.н., професор, sadovoyav@ukr.net

Ю.В. Сохіна¹, к.т.н., доцент, jvsokhina@gmail.com

¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

ПОБУДОВА ІДЕНТИФІКАТОРА КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ РОТОРА В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ МАШИНАМИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

У статті для різних режимів роботи машини подвійного живлення отримані нові рівняння математичної моделі ідентифікатора кутового положення ротора, які можуть використовуватися при синтезі систем векторного керування такими машинами. Здійснено аналіз стійкості розробленого ідентифікатора, результати якого розширюють можливості його використання в різноманітних режимах роботи електроприводів.

Ключові слова: асинхронна машина, координатні перетворення, тригонометричні функції кута повороту ротора, векторне керування, асимптотична стійкість.

In the article for different modes of operation of the dual-feeding machine new equations of the mathematical model of the identifier of the angular position of the rotor are obtained, which can be used in the synthesis of vector control systems of such machines. The analysis of stability of the developed identifier which results expand possibilities of its use in various operating modes of electric drives is carried out.

Keywords: asynchronous machine, coordinate transformations, trigonometric functions of rotor rotation angle, vector control, asymptotic stability.

Постановка проблеми

У системах векторного керування асинхронними електроприводами (ЕП) з перетворювачем частоти в колі ротора необхідно в блоках координатних перетворень використовувати значення синуса і косинуса кута повороту ротора (вісь d) відносно статора (вісь α). При підключенні статора асинхронної машини (АМ) до мережі живлення одержуємо ЕП за схемою машини подвійного живлення [1]. Якщо використовувати в якості давача положення електричну мікромашину малої потужності, виникають досить складні задачі конструкційного характеру — розміщення і надійного кріплення його на валу двигуна і відповідно задачі загального компонування агрегату. Для машин великої потужності, як правило унікальних, встають задачі розробки і створення конструкції самого давача [2]. Якщо можуть бути використані серійні давачі кутового положення ротора, задачі розміщення і кріплення їх не менш складні. У цих випадках потрібно виводити другий кінець вала з корпусу двигуна з контактними кільцями, що ускладнює його конструкцію. Ситуація ускладнюється при створенні серій двигунів на різні потужності і номінальні швидкості обертання. Якщо ж врахувати, що давачі положення є прецизійними електричними машинами з малими припустимими несиметріями фазних напруг і коефіцієнтом нелінійних спотворень, то в умовах масового виробництва асинхронних машин розробка і створення давачів положення роторів стають самостійною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загальна ідея ідентифікації викладена в роботі [3], де вказується, що для синтезу ідентифікатора кутового положення ротора можна використовувати вектор будь-якої електромагнітної величини. У джерелі [4] наведений ідентифікатор, який використовує вектор потокозчеплення статора. Але цей ідентифікатор у своєму складі містить інтегратори не охоплені негативними зворотними зв'язками. Такі інтегратори в процесі роботи неминуче накопичують помилку, що приводить до практичної непрацездатності ідентифікатора. Тому одна з умов ідентифікації полягає в необхідності на практиці відходу від ідеального інтегрування щоб уникнути нагромадження помилки при інтегруванні. Таким чином доцільно продовжити пошук нових рів-

нянь ідентифікаторів, у яких характеристичні рівняння збуреного руху не містять нульових коренів. Слід зазначити, що рівняння математичних моделей ідентифікаторів, у яких базовими є вектори струмів статора або ротора ще не досліджувалися.

Формулювання мети дослідження

У роботі ставиться задача здійснення синтезу і наступного аналізу властивостей ідентифікатора кутового положення ротора у системах векторного керування машинами подвійного живлення з використанням координатних перетворень проєкцій вектора струму статора і рівнянь електромагнітних контурів АМ.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо ідентифікацію кутового положення ротора з використанням вектора струму статора. Скористаємося відомими співвідношеннями координатних перетворень [4—6]. Проєкції струмів статора $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ на осі α, β можна визначити на підставі вимірюваних давачами фазних струмів: $I_{s\alpha} = I_{sA}$; $I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{sB} - I_{sC})$. Проєкції струмів статора на осі α, β статора та d, q ротора пов'язані між собою співвідношеннями

$$\hat{I}_{sd} = I_{s\alpha} \cos \gamma + I_{s\beta} \sin \gamma; \quad \hat{I}_{sq} = I_{s\beta} \cos \gamma - I_{s\alpha} \sin \gamma. \quad (1)$$

За умови вимірювання або обчислення проєкцій струму статора \hat{I}_{sd} , \hat{I}_{sq} на ортогональні осі ротора d, q можна визначити кутове положення ротора $\cos \gamma$, $\sin \gamma$, розв'язавши рівняння (1):

$$\cos \gamma = \frac{\begin{vmatrix} \hat{I}_{sd} & I_{s\beta} \\ \hat{I}_{sq} & -I_{s\alpha} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} I_{s\alpha} & I_{s\beta} \\ I_{s\beta} & -I_{s\alpha} \end{vmatrix}} = \frac{I_{s\alpha} \hat{I}_{sd} + I_{s\beta} \hat{I}_{sq}}{I_s^2}; \quad \sin \gamma = \frac{\begin{vmatrix} I_{s\alpha} & \hat{I}_{sd} \\ I_{s\beta} & \hat{I}_{sq} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} I_{s\alpha} & I_{s\beta} \\ I_{s\beta} & -I_{s\alpha} \end{vmatrix}} = \frac{I_{s\beta} \hat{I}_{sd} - I_{s\alpha} \hat{I}_{sq}}{I_s^2}, \quad (2)$$

де $I_s^2 = I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2$ – квадрат модуля струму статора.

Таким чином для ідентифікації кутового положення ротора необхідно одержати математичну модель, яка дозволить визначати проєкції \hat{I}_{sd} , \hat{I}_{sq} . Для цього скористаємося рівняннями електромагнітних контурів асинхронної машини в осях d, q [4-6]:

$$\vec{U}_s = R_s \vec{I}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \quad \vec{U}_r = R_r \vec{I}_r + \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_r. \quad (3)$$

$$\vec{\Psi}_s = L_s \vec{I}_s + L_m \vec{I}_r; \quad \vec{\Psi}_r = L_r \vec{I}_r + L_m \vec{I}_s. \quad (4)$$

Запишемо рівняння потокозчеплень (4) в осях d, q :

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; & \Psi_{rd} &= L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \\ \Psi_{sq} &= L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; & \Psi_{rq} &= L_r I_{rq} + L_m I_{sq}. \end{aligned} \quad (5)$$

З першої пари рівнянь (5) випливає:

$$\hat{I}_{sd} = \frac{\hat{\Psi}_{sd} - L_m I_{rd}}{L_s}; \quad \hat{I}_{sq} = \frac{\hat{\Psi}_{sq} - L_m I_{rq}}{L_s}. \quad (6)$$

Тут і далі змінні з «капелюшком» обчислюються ідентифікатором, а змінні не позначені «капелюшком» вимірюються давачами струму або напруги і вважаються в рівняннях відомими величинами.

Запишемо рівняння рівноваги напруг статора в осях d, q , які витікають з першого рівняння (3) при $\omega_k = \omega$:

$$\hat{U}_{sd} = R_s \hat{I}_{sd} + p \hat{\Psi}_{sd} - \omega \hat{\Psi}_{sq}; \quad \hat{U}_{sq} = R_s \hat{I}_{sq} + p \hat{\Psi}_{sq} + \omega \hat{\Psi}_{sd}. \quad (7)$$

Після підстановки виразів (6) у (7) приходимо до рівнянь

$$p\widehat{\Psi}_{sd} = -\frac{R_s}{L_s}\widehat{\Psi}_{sd} + \omega\widehat{\Psi}_{sq} + k_s R_s I_{rd} + \widehat{U}_{sd}; \quad p\widehat{\Psi}_{sq} = -\frac{R_s}{L_s}\widehat{\Psi}_{sq} - \omega\widehat{\Psi}_{sd} + k_s R_s I_{rq} + \widehat{U}_{sq}. \quad (8)$$

Проекції вектора напруги статора утворюються на виході координатного перетворювача

$$\widehat{U}_{sd} = U_{s\alpha} \overline{\cos\gamma} + U_{s\beta} \overline{\sin\gamma}; \quad \widehat{U}_{sq} = U_{s\beta} \overline{\cos\gamma} - U_{s\alpha} \overline{\sin\gamma}. \quad (9)$$

Якщо в співвідношення (9) замість синуса і косинуса підставити вирази (2), а замість проекцій струмів статора формули (6), то після перетворень отримаємо наступне:

$$\begin{aligned} \widehat{U}_{sd} &= \frac{(U_{s\alpha} I_{s\alpha} + U_{s\beta} I_{s\beta})}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sd}}{L_s} - k_s I_{rd} \right) - \frac{(U_{s\beta} I_{s\alpha} - U_{s\alpha} I_{s\beta})}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sq}}{L_s} - k_s I_{rq} \right) = \\ &= \frac{p_s}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sd}}{L_s} - k_s I_{rd} \right) - \frac{q_s}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sq}}{L_s} - k_s I_{rq} \right); \\ \widehat{U}_{sq} &= \frac{(U_{s\alpha} I_{s\alpha} + U_{s\beta} I_{s\beta})}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sq}}{L_s} - k_s I_{rq} \right) + \frac{(U_{s\beta} I_{s\alpha} - U_{s\alpha} I_{s\beta})}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sd}}{L_s} - k_s I_{rd} \right) = \\ &= \frac{p_s}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sq}}{L_s} - k_s I_{rq} \right) + \frac{q_s}{I_s^2} \left(\frac{\widehat{\Psi}_{sd}}{L_s} - k_s I_{rd} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

де $p_s = U_{s\alpha} I_{s\alpha} + U_{s\beta} I_{s\beta}$ — активна потужність статора; $q_s = U_{s\beta} I_{s\alpha} - U_{s\alpha} I_{s\beta}$ — реактивна потужність статора; $k_s = L_m / L_s$.

Підставляємо співвідношення (10) у диференціальні рівняння (8) і після перетворень одержуємо наступну систему рівнянь, яка ідентифікує проекції вектора потокозчеплення статора на ортогональні осі координат ротора:

$$\begin{aligned} p\widehat{\Psi}_{sd} &= \left(-\frac{R_s}{L_s} + \frac{p_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sd} + \left(\omega - \frac{q_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sq} - k_s p_s \frac{I_{rd}}{I_s^2} + k_s q_s \frac{I_{rq}}{I_s^2} + k_s R_s I_{rd}; \\ p\widehat{\Psi}_{sq} &= \left(-\frac{R_s}{L_s} + \frac{p_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sq} + \left(-\omega + \frac{q_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sd} - k_s p_s \frac{I_{rq}}{I_s^2} - k_s q_s \frac{I_{rd}}{I_s^2} + k_s R_s I_{rq}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для визначення режимів роботи ЕП, при яких можливо використовувати рівняння (11) для процесу ідентифікації кутового положення ротора, здійснимо аналіз стійкості системи рівнянь (11), яку запишемо у матричній формі

$$p\widehat{X} = A\widehat{X} + BU, \quad (12)$$

$$\text{де } \widehat{X} = \begin{pmatrix} \widehat{\Psi}_{sd} & \widehat{\Psi}_{sq} \end{pmatrix}^T, \quad U = \begin{pmatrix} I_{rd} & I_{rq} \end{pmatrix}^T, \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix},$$

$$a_{11} = -\frac{R_s}{L_s} + \frac{p_s}{L_s I_s^2}; \quad a_{12} = \omega - \frac{q_s}{L_s I_s^2}; \quad a_{22} = a_{11}; \quad a_{21} = -a_{12}; \quad (13)$$

$$b_{11} = k_s R_s - k_s \frac{p_s}{I_s^2}; \quad b_{12} = k_s \frac{q_s}{I_s^2}; \quad b_{22} = b_{11}; \quad b_{21} = -b_{12}.$$

Рівняння збуреного руху

$$pX - p\widehat{X} = pe = AX + BU - A\widehat{X} - BU = A(X - \widehat{X}) = Ae, \quad (14)$$

$$\text{де } e = X - \widehat{X} = \begin{pmatrix} \Psi_{sd} - \widehat{\Psi}_{sd} & \Psi_{sq} - \widehat{\Psi}_{sq} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \Delta\Psi_{sd} & \Delta\Psi_{sq} \end{pmatrix}^T$$

Розглянемо функцію Ляпунова

$$V = e^T e = \Delta\Psi_{sd}^2 + \Delta\Psi_{sq}^2, \quad (15)$$

повна похідна якої за часом

$$pV = pe^T e + e^T pe = e^T A^T e + e^T A e = e^T (A^T + A) e = e^T K e, \quad (16)$$

де матриця квадратичної форми дорівнює $K = A^T + A$.

Визначимо матрицю квадратичної форми (16). З урахуванням умов (13)

$$K = A + A^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ -a_{12} & a_{11} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & -a_{12} \\ a_{12} & a_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2a_{11} & 0 \\ 0 & 2a_{11} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Згідно з критерієм Сильвестра квадратична форма (16) буде негативно визначеною при виконанні нерівностей

$$\Delta_1 = 2a_{11} < 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 2a_{11} & 0 \\ 0 & 2a_{11} \end{vmatrix} = 4a_{11}^2 > 0. \quad (18)$$

Друга нерівність (18) виконується при будь-яких значеннях змінних стану. Тому стійкість системи (11) зводиться до виконання першої нерівності (18), яка з урахуванням (13) приймає вигляд

$$-\frac{R_s}{L_s} + \frac{p_s}{L_s I_s^2} < 0 \Rightarrow \frac{p_s}{I_s^2} < R_s \Rightarrow R_s I_s^2 > p_s. \quad (19)$$

З умови (19) випливає, що ідентифікатор (11) буде стійким тільки для деяких режимів. Перший з режимів виникає, якщо при закороченні обмоток статора ЕП працює з живленням обмоток ротора від перетворювача частоти. У цьому випадку напруги статора $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ дорівнюють нулю і потужність статора p_s також дорівнює нулю. При цьому струми, які мають частоту ковзання, в обмотках статора будуть протікати і втрати активної потужності будуть більше нуля, тобто умова стійкості (19) виконується. Другий стійкий режим виникає при роботі ЕП у режимі асинхронізованого генератора, коли активна потужність через коло статора рекуперується у мережу й активна потужність в умові (19) стає негативною. Важливо відмітити, що ідентифікатор (11) згідно з умовою (19) залишається стійким, якщо зворотні зв'язки, які охоплюють інтегратори в структурній схемі, яка відповідає системі (11), негативні і ні при яких значеннях активної потужності p_s не становляться позитивними.

Характеристичне рівняння матриці A власної динаміки ідентифікатора (11) має вигляд

$$p^2 + (-a_{11} - a_{22})p + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) = 0. \quad (20)$$

Корені цього рівняння з урахуванням виразів (13) дорівнюють

$$p_{1,2} = -\frac{R_s}{L_s} + \frac{p_s}{L_s I_s^2} \pm j \left| \omega - \frac{q_s}{L_s I_s^2} \right|. \quad (21)$$

Коефіцієнти матриці стану A залежать від кутової швидкості обертання ротора, активної і реактивної потужностей статора. Однак зі співвідношень (19) і (21) випливає, що стійкість ідентифікатора визначається тільки знаком активної потужності. До складу уявної частини коренів характеристичного полінома входять швидкість обертання ротора і реактивна потужність статора. Таким чином, у процесі керування швидкістю обертання ротора і реактивною потужністю ЕП буде безперервно змінюватися розташування коренів характеристичного полінома ідентифікатора на комплексній площині. Тому при дотриманні умови (19) стійкість ідентифікатора зберігається, але точність ідентифікації проєкцій $\widehat{\Psi}_{sd}$, $\widehat{\Psi}_{sq}$ і динаміка цього процесу залежать від зміни обох складових потужностей статорного кола і швидкості обертання ротора.

Умова стійкості (19) системи рівнянь (11) вказує на те, що запропонований алгоритм ідентифікації кутового положення ротора можливо використовувати для асинхронізованих генераторів з векторною системою керування. Активна потужність статорного кола буде рекуперуватися в мережу, що відповідає стійкості системи (11). Однак у режимах інтенсивного наростання швидкості обертання ротора активна потужність на вал АМ може надходити не тільки від первинного двигуна, але одночасно і з мережі через статорне коло АМ. У такому випадку умова стійкості (19) порушується. Пропонується для забезпечення стійкості ідентифікатора (11) на короткочасних інтервалах розгону ввести в його склад нелінійність типу «зона нечутливості».

Тоді рівняння (11) приймають наступний вигляд

$$\begin{aligned} p \widehat{\Psi}_{sd} &= \left(-\frac{R_s}{L_s} + \frac{\bar{p}_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sd} + \left(\omega - \frac{q_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sq} - k_s p_s \frac{I_{rd}}{I_s^2} + k_s q_s \frac{I_{rq}}{I_s^2} + k_s R_s I_{rd}; \\ p \widehat{\Psi}_{sq} &= \left(-\frac{R_s}{L_s} + \frac{\bar{p}_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sq} + \left(-\omega + \frac{q_s}{L_s I_s^2} \right) \widehat{\Psi}_{sd} - k_s p_s \frac{I_{rq}}{I_s^2} - k_s q_s \frac{I_{rd}}{I_s^2} + k_s R_s I_{rq}, \end{aligned} \quad (22)$$

де

$$\bar{p}_s = \begin{cases} p_s, & \text{якщо } p_s < 0; \\ 0, & \text{якщо } p_s \geq 0. \end{cases} \quad (23)$$

Ідентифікатор кутового положення ротора проводить обчислення в наступній послідовності. У реальному часі розв'язується система рівнянь (22) і знаходяться проекції вектора потокозчеплення статора на ортогональні осі координат ротора. Далі за виразами (6) визначаються проекції вектора струму статора на осі d,q і за формулами (2) обчислюються синус і косинус кута повороту ротора. При цьому швидкість обертання ротора, струми і напруги, а, отже, миттєві значення потужностей, вимірюються давачами і є відомими величинами.

Працездатність ідентифікатора кутового положення ротора, який будується згідно з рівняннями (22), (6), (2), перевірена на математичній моделі системи векторного керування в колі ротора машини подвійного живлення, яка працює в режимі асинхронізованого генератора.

Результати математичного моделювання для електропривода з двигуном 4AK160S4Y3 ($P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_{лн} = 380 \text{ В}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $U_2 = 305 \text{ В}$) наведені на рис. 1. Пуск АМ до номінальної швидкості обертання здійснювався з закороченим статором і живленням обмоток ротора від перетворювача частоти. У момент часу $t = 0,5 \text{ с}$ статор підключався до мережі живлення, що викликало досить тривалі загасальні коливання опорного вектора потокозчеплення статора і його реактивної потужності. У цьому і у всіх інших режимах до валу АМ прикладався рушійний момент первинного двигуна, тобто ЕП працював в генераторному режимі, коли в статистиці основний потік активної потужності спрямований від валу АМ до статора, через який рекупрується в мережу. У момент часу $t = 1,2 \text{ с}$ починалося гальмування до швидкості 80 рад/с , а після $t = 2 \text{ с}$ здійснювався розгін до 130 рад/с .

Усі зміни режимів за швидкістю і потужностями проводилися з метою перевірки стійкості ідентифікатора кутового положення ротора і з'ясування точності ідентифікації для забезпечення працездатності векторної системи керування асинхронізованим генератором.

На графіках активної і реактивної потужностей можна бачити їх стрибкоподібні зміни. Для сталого режиму рівні активної потужності змінювалися шляхом варіювання рушійного моменту первинного двигуна в моменти часу $t = 0,5 \text{ с}$ і $t = 2 \text{ с}$. При цьому рекуперація активної енергії в мережу в статистиці зберігалася. Зміна режиму реактивної потужності статора (споживання і генерація) здійснювалася керуванням реактивною складовою вектора струму ротора.

Зміна знака реактивної потужності не впливає на стійкість ідентифікатора. Однак ідентифікатор чутливий до знака активної потужності статора, що чітко видно при розгоні, який починається при $t = 2 \text{ с}$, коли статор АМ переходить до споживання активної потужності з мережі. Результати математичного моделювання показали, що на цій ділянці система (11) втрачає стійкість, але система рівнянь (22) стійкість зберігає за рахунок використання в її складі нелінійної функції, яка описується виразом (23). Якість ідентифікації потокозчеплення статора в осях d, q, а також синуса і косинуса кута повороту ротора відносно статора представлені на рисунку 1 для короткої ділянки розгону АМ, коли статор споживає активну потужність з мережі. Це найважчий режим роботи ідентифікатора — у всіх інших представлених по швидкостях і потужностях режимах спостерігається повний збіг реальних потокозчеплень Ψ_{sd} , Ψ_{sq} і тригонометричних функцій $\cos \gamma$, $\sin \gamma$ з їх обчисленими за рівняннями (22) і (2) відповідно значеннями $\widehat{\Psi}_{sd}$, $\widehat{\Psi}_{sq}$ та $\overline{\cos \gamma}$, $\overline{\sin \gamma}$. На інтервалі, коли $p_s > R_s I_s^2$ і умова (19) порушується, ідентифікатор (22) зберігає стійкість за рахунок дії функції (23), але точність ідентифікації погіршу-

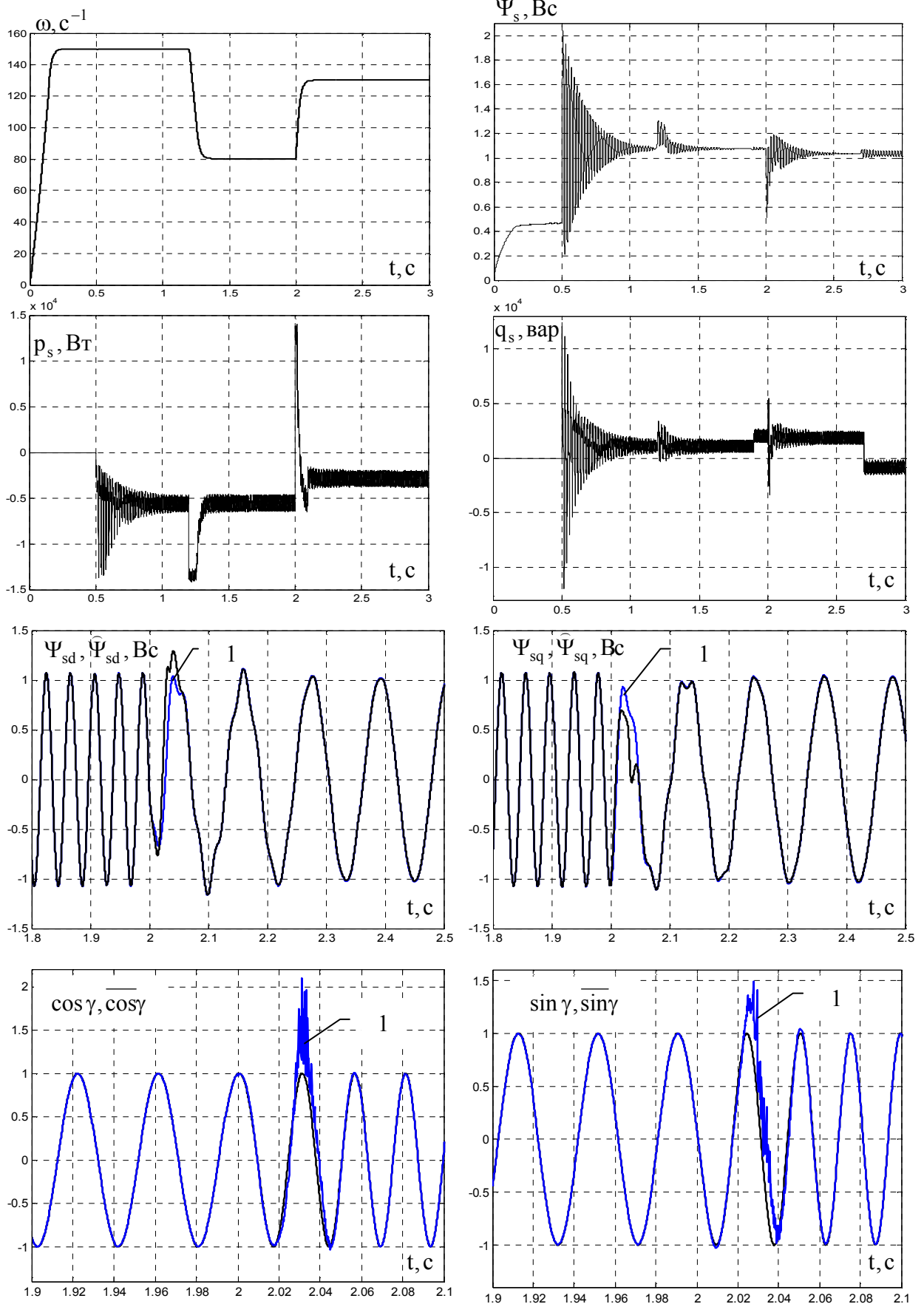


Рис. 1. Перехідні процеси в машині подвійного живлення та її системі керування з ідентифікатором кута повороту ротора (22)

ється, що видно з графіків перехідних процесів змінних $\widehat{\Psi}_{sd}$, $\widehat{\Psi}_{sq}$, $\overline{\cos\gamma}$, $\overline{\sin\gamma}$, позначених цифрою 1. У силу асимптотичної стійкості системи рівнянь (22) досить швидко (за час $2,05c-2,02c=0,03c$) помилка ідентифікації знову досягає практично нульового значення.

Висновки

У статті для електроприводів з векторним керуванням по колу ротора здійснений синтез ідентифікатора кута повороту ротора відносно статора, заснованого на використанні вектору струму статора. Отримані нові рівняння ідентифікатора потокозчеплень (22), досліджена їх стійкість і за умовами стійкості визначені типи електроприводів, у яких можливо застосовувати цей ідентифікатор. Для забезпечення асимптотичної стійкості ідентифікатора (22) в області, де порушуються умови стійкості (19), запропоновано в рівняння ідентифікатора ввести нелінійну функцію (23). Стійкість системи векторного керування і достатня точність ідентифікації при використанні запропонованих рівнянь і функцій підтверджені методом математичного моделювання системи електропривода, що рекомендується, у різних режимах роботи. Наступні дослідження доцільно направити на розробку системи ідентифікації кутового положення ротора на основі використання вектора струму ротора.

Список використаної літератури

1. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока, М.: Наука, 1969, 140 с.
2. Датчик положения ротора электрического двигателя: патент №2357348, РФ. МПК H02K 29/08, H02K 29/06. №2008125533/09; заявл. 23.06.2008; опубл. 27.05.2009. Бюл.№15.
3. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины, М: Энергоатомиздат, 1984.192 с.
4. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохина Ю.В. Системы керування асинхронними вентильними каскадами. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 294 с.
5. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. Днепропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. 470 с.
6. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока/ «Ивановский государственный энергетический университет». Иваново: 2008. 298 с.

CONSTRUCTION OF ROTOR ANGLE IDENTIFIER IN VECTOR CONTROL SYSTEMS OF DOUBLE FEED MACHINES

Klyuyev O., Sadovoi A., Sokhina Y.

Abstract

In asynchronous electric drives with vector control on the rotor, it is necessary to calculate the value of the sine and cosine of the angle of rotation of the rotor relative to the stator to form control actions. When using angle sensors, complex structural tasks can arise — placement and reliable mounting of the sensor on the shaft and, accordingly, the task of the overall layout of the unit. For high-power machines, the tasks of developing and creating the design of the sensor itself arise. If serial rotor angular position sensors can be used, the task of placing and mounting the sensor is no less difficult. In these cases it is necessary to deduce the second end of a shaft from the case of the engine with contact rings that complicates its design. Therefore, the urgent need to create more reliable electric drives with vector control systems on the rotor is the synthesis of identifiers of the angle of rotation of the rotor.

Identifiers are known whose calculation algorithms are based on determining the projections of the flow coupling vectors. In the work with the use of coordinate transducers of projections of stator or rotor current vectors and equations of electromagnetic circuits of an asynchronous machine, the synthesis and subsequent analysis of the properties of the rotor position angle identifier in vector

control systems of dual power machines is performed. New equations of the identifier of flux couplings are received, its stability is investigated and on conditions of stability types of electric drives in which it is possible to apply the offered identifier are defined. The stability of the vector control system and sufficient identification accuracy when using the proposed equations and functions are confirmed by the method of mathematical modeling of the recommended electric drive systems in different operating modes.

References

- [1] Botvinnik M.M.& SHakaryan Yu.G. (1969) *Upravlyaemaya mashina peremennogo toka*, M.: Nauka, 140 p. [in Russian].
- [2] Malafeev S.I.& Salov S.A. (2009) *Patent № RU2357348C1 Datchik polozheniya rotora elektricheskogo dvigatelya*, [in Russian].
- [3] SHakaryan Yu.G. (1984) *Asinhronizirovannyye sinhronnyye mashiny* M.: Energoatomizdat, 192 p. [in Russian].
- [4] Klyuyev O.V.& Sadovoi O.V.& Sokhina Yu.V. (2018) *Systemy keruvannia asynkhronnymy ventylnymy kaskadamy*. Kamianske: DDTU. 294 p. [in Ukrainian].
- [5] Pivnyak G.G.& Volkov A.V. (2006) *Sovremennyye chastotno-reguliruyemye asinhronnyye elektroprivody s shirotno-impul'snoj modulyaciej*. Dnipropetrovs'k, Nacional'nij gornichij universitet, 470 p. [in Russian].
- [6] Vinogradov A.B. (2008) *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka/ «Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet»*. Ivanovo. 298 p.[in Russian].