

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.6

УДК 62-83:681.513.5

Клюєв О.В., к.т.н., наук, доцент, ORCID: 0000-0003-4542-3317, e-mail: kluev2006@ukr.net

Садовой О.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9739-3661, e-mail: sadovoyav@ukr.net

Сохіна Ю.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-4329-5182, e-mail: jvsokhina@gmail.com

Донченко А.П., зав. лабораторії, e-mail: donchencko45@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kliuiev Oleh, Candidate of technical sciences, Associate professor Electrotechnical and Electromechanical Department

Sadovoi Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor Electrotechnical and Electromechanical Department

Sokhina Yuliya, Candidate of technical sciences, Associate professor Electrotechnical and Electromechanical Department

Donchenko Andrii, head of laboratories Electrotechnical and Electromechanical Department Dniprovsky State Technical University, Kamianske

СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧА МОМЕНТУ НАВАНТАЖЕННЯ В СКЛАДІ ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАШИНОЮ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

У роботі методом модального керування здійснений синтез спостерігача моменту статичного навантаження на валу машини подвійного живлення. В основу синтезу покладені рівняння каналу активної потужності машини подвійного живлення в осях координат, орієнтованих за вектором потокозчеплення статора. Синтез спостерігача проведений виходячи з припущення, що момент навантаження на валу асинхронної машини змінюється за вентиляторною характеристикою. Однак при обнуленні одного параметра представлена в статті структура спостерігача може використовуватися для обчислення постійного моменту навантаження, у тому числі і при його стрибкоподібній зміні. Працездатність спостерігача моменту навантаження і достатня якість оцінювання перевірені методом математичного моделювання.

Ключові слова: машина подвійного живлення; модель каналу активної потужності; спостерігач стану; характеристичний поліном; розподіл коренів; момент навантаження.

In this paper, the synthesis of the observer of the moment of static load on the shaft of a doubly fed machine was carried out using the modal control method. The synthesis is based on the equations of the active power channel of a doubly fed machine in coordinate axes oriented along the stator flux linkage vector. Synthesis of the observer was carried out on the basis of assumptions that the load moment on the shaft of an asynchronous machine varies according to the fan characteristic. However, when one parameter is set to zero, the observer structure presented in the article can be used to calculate the constant load torque, including when it changes abruptly. The operability of the load moment observer and the sufficient quality of the estimation were verified by mathematical modeling.

Keywords: doubly fed machine; active power channel model; state observer; characteristic polynomial; root distribution; load moment.

Постановка задачі

Стандартна реалізація асинхронного електропривода за схемою машини подвійного живлення (МПЖ) полягає в тому, що статор асинхронної машини (АМ) підключається до мережі, а роторне коло АМ живиться від перетворювача частоти. У векторній системі керування МПЖ

вектор струму ротора розкладається на дві проекції: активну і реактивну складові струму [1]. Регулюючи реактивний струм ротора можна змінювати величину і характер реактивної потужності статорного кола. Таким чином, впливаючи на змінні стану ротора в МПЖ можливо змінювати енергетичні показники статорного кола. Одночасно можливо регулювати змінні стану статора і змінювати потоки потужності роторного кола. У статті [2] доведено, що, якщо МПЖ у руховому режимі недовантажена, то зниженням напруги статора на визначену величину можна домогтися максимізації коефіцієнта потужності роторного кола. У статті [3] розроблений релейний регулятор з нелінійною функцією переключення, який забезпечує регулювання модуля потужності статора за допомогою транзисторного силового регулятора напруги в колі статора. Екстремальне регулювання реактивної потужності ротора МПЖ здійснюється за статором. При цьому до складу цільової функції входить момент статичного навантаження, який не піддається виміру. Тому для визначення моменту навантаження в [4] розроблений спостерігач, який знаходиться в колі зворотного зв'язку векторної системи керування МПЖ і оцінює момент навантаження на валу МПЖ при його плавній зміні у функції швидкості відповідно до вентиляторної механічної характеристики. Однак окремо динаміка спостерігача моменту навантаження на валу МПЖ не досліджувалася.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Спостерігачі моменту навантаження застосовуються в різних системах електропривода. Наприклад, у статті [5] застосовується спостерігач моменту на валу синхронної машини з постійними магнітами, у якому ковзний режим забезпечує простоту реалізації спостерігача і його інваріантність до параметричних збурень. Показано, що в такому спостерігачі можливо замінити знакову функцію на функцію насичення з додатковим контуром зворотного зв'язку. У роботі [6] синтезований нелінійний ідентифікатор моменту навантаження, у складі якого використовується знакова функція, а стійкість системи керування перевіряється другим методом Ляпунова. Спостерігачі моменту навантаження використовуються в системах керування електромобілями. У роботі [7] створена модель динамічного моменту навантаження синхронного двигуна з постійними магнітами гібридного транспортного засобу на основі рівняння механічного руху і теорії векторного керування. У роботі [8] синтезована векторна система керування асинхронним двигуном із двома ідентифікаторами: MRAS спостерігач швидкості, а також спостерігач потужності статора й електромагнітного моменту. В останньому спостерігачі збіжність адаптивної моделі потоку статора до бажаної моделі забезпечується функцією адаптації, яка реалізує ковзний режим другого порядку. У статті [9] запропонована структурна схема спостерігача Люенбергера з адаптацією, який дозволяє в реальному часі проводити оцінку значення частоти обертання ротора і моменту навантаження на валу електродвигуна відцентрового компресора. На основі лінеаризованої моделі асинхронного двигуна спостерігач синтезується за допомогою методу модального керування з розташуванням коренів характеристичного рівняння спостерігача за стандартною формою Бесея.

Формулювання мети дослідження

Огляд публікацій показує, що, як правило, спостерігач моменту навантаження синтезується в складі векторних систем керування асинхронними машинами за статором для підвищення точності регулювання швидкості. У роботі [4] обґрунтована необхідність використання спостерігача моменту статичного навантаження в потужних електроприводах за схемою МПЖ для поліпшення її енергетичних показників. Тому в даній статті ставиться задача синтезу модального спостерігача моменту навантаження на валу МПЖ і дослідження його динамічних властивостей при стрибкоподібній зміні моменту навантаження на різних рівнях стабілізації швидкості МПЖ і різних розподілах коренів характеристичного полінома спостерігача.

Виклад основного матеріалу

В основу синтезу спостерігача стану покладені відомі структура і параметри лінеаризованого об'єкта керування. Значення векторів стану об'єкта керування і спостерігача в початковий момент часу треба забезпечити однаковими, а вхідні впливи відомі і прикладаються одночасно до електричної машини і спостерігача. Рівняння динаміки асинхронної машини з керуванням за ротором в осях координат, спрямованих за вектором потужності статора, наведені в монографії [4]. Якщо з загальної системи рівнянь [4, с. 78] узяти перше і друге рівняння,

які описують перехідні процеси в каналі керування за складовою струму ротора, яка утворює електромагнітний момент МПЖ, то після перетворень одержимо наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} p\omega_r &= -\frac{3Nk_s\Psi_s}{2J}I_{rv} - \frac{M_c}{J}; \\ pI_{rv} &= \frac{k_sN\Psi_s}{L_\delta}\omega_r - \frac{R''}{L_\delta}I_{rv} + \frac{U_{rv}}{L_\delta} - \frac{k_s}{L_\delta}U_{sv} - \frac{U_{pr}}{L_\delta}, \end{aligned} \quad (1)$$

де U_{rv}, U_{sv} — активні складові напруг ротора і статора відповідно; $U_{pr} = (\omega_k - N\omega_r)L_\delta I_{ru}$ — сигнал перехресного зв'язку; ω_k — частота обертання опорного вектора потокозчеплення статора; M_c — момент статичного навантаження на валу МПЖ.

У каналі активної потужності МПЖ (1) змінні U_{rv}, U_{sv}, U_{pr} представляють собою вхідні сигнали, а величина M_c є впливом, що збурює. Тоді характеристичний поліном системи рівнянь (1) прийме наступний вигляд

$$\begin{vmatrix} p & \frac{3Nk_s\Psi_s}{2J} \\ -\frac{Nk_s\Psi_s}{L_\delta} & p + \frac{R''}{L_\delta} \end{vmatrix} = p^2 + \frac{R''}{L_\delta}p + \frac{3N^2k_s^2\Psi_s^2}{2JL_\delta}. \quad (2)$$

При заповненні вектора стану, вводимо позначення $x_1 = \omega_r$, $x_2 = I_{rv}$. Збурення у вигляді моменту статичного навантаження M_c не може бути обмірюване. Тому воно розглядається як одна з змінних стану $x_3 = M_c$ розширеного в такий спосіб пристрою, що спостерігає.

Якщо навантажувальний механізм має вентиляторну механічну характеристику, то аналітичний вираз механічної характеристики має наступний вигляд

$$M_c = M_0 + (M_{ch} - M_0)(\omega_r/\omega_{rn})^2, \quad (3)$$

де M_c — момент навантаження, який створює виробничий механізм при швидкості ω_r ; M_0 — момент тертя; M_{ch} — момент навантаження на валу МПЖ при номінальній швидкості ω_{rn} .

Щоб зв'язати зовнішній вплив M_c з змінними стану об'єкта (1) треба взяти похідну від виразу (3) за часом з використанням першого рівняння системи (1):

$$pM_c = -\frac{3Nk_s\Psi_s b}{2J}I_{rv} - \frac{b}{J}M_c, \quad (4)$$

де

$$b = 2(M_{ch} - M_0)\omega_r/\omega_{rn}^2 \quad (5)$$

коефіцієнт, який лінійно залежить від швидкості ротора.

Додаємо вираз (4) до системи (1) і отримуємо наступні рівняння розширеного об'єкта керування у матричній формі:

$$pX = AX + BU; \quad Y = CX, \quad (6)$$

де X — вектор стану системи; U — вектор відомих вхідних сигналів; A і B — матриці стану і входу; Y — вектор вимірюваних вихідних змінних і матриця виходу C , знаходяться як:

$$X = \begin{pmatrix} \omega_r \\ I_{rv} \\ M_c \end{pmatrix}; \quad U = \begin{pmatrix} U_{rv} \\ U_{sv} \\ U_{pr} \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{3Nk_s\Psi_s}{2J} & -\frac{1}{J} \\ \frac{Nk_s\Psi_s}{L_\delta} & -\frac{R''}{L_\delta} & 0 \\ 0 & -\frac{3Nk_s\Psi_s b}{2J} & -\frac{b}{J} \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -k_s & -1 \\ L_\delta & L_\delta & L_\delta \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad Y = I_{rv}; \quad C = (0 \quad 1 \quad 0).$$

Спостерігач стану задається рівнянням

$$p\hat{X} = (A - KC)\hat{X} + BU + KY, \quad (7)$$

де \hat{X} — визначений спостерігачем вектор стану об'єкта; K — вектор коефіцієнтів підсилення спостерігача.

Щоб задати потрібне рівняння спостерігача треба розрахувати елементи вектора модального зворотного зв'язку $K = (k_1 \quad k_2 \quad k_3)^T$. Характеристичний поліном замкненої через спостерігач системи записується наступним чином

$$\det[pE - (A - KC)] = \begin{vmatrix} p & \frac{3Nk_s\Psi_s}{2J} + k_1 & \frac{1}{J} \\ -\frac{Nk_s\Psi_s}{L_\delta} & p + \frac{R''}{L_\delta} + k_2 & 0 \\ 0 & \frac{3Nk_s\Psi_s b}{2J} + k_3 & p + \frac{b}{J} \end{vmatrix} = p^3 + \left(\frac{R''}{L_\delta} + \frac{b}{J} + k_2\right)p^2 + \left(\frac{3N^2k_s^2\Psi_s^2}{2JL_\delta} + \frac{Nk_s\Psi_s k_1}{L_\delta} + \frac{bR''}{JL_\delta} + \frac{bk_2}{J}\right)p + \frac{Nk_s\Psi_s bk_1}{JL_\delta} - \frac{Nk_s\Psi_s k_3}{JL_\delta}. \quad (8)$$

Для забезпечення спостерігачу бажаних динамічних властивостей задаємося стандартною поліноміальною формою третього порядку

$$D(p) = p^3 + A_1\Omega_0 p^2 + A_2\Omega_0^2 p + \Omega_0^3, \quad (9)$$

де Ω_0 — середній геометричний корінь характеристичного рівняння спостерігача стану.

Коефіцієнти A_1 і A_2 на комплексній площині визначають тип розташування коренів характеристичного рівняння спостерігача. Для розподілу за Батервортом $A_1 = A_2 = 2$, а для біноміального розподілу $A_1 = A_2 = 3$. З порівняння доданків при однакових ступенях p рівнянь (8) і (9) знаходяться аналітичні вирази для коефіцієнтів коригувальних зв'язків вектора K :

$$k_2 = A_1\Omega_0 - \frac{R''}{L_\delta} - \frac{b}{J};$$

$$k_1 = A_2\Omega_0^2 \frac{L_\delta}{Nk_s\Psi_s} - \frac{3Nk_s\Psi_s}{2J} - \frac{bR''}{JNk_s\Psi_s} - \frac{bL_\delta k_2}{JNk_s\Psi_s};$$

$$k_3 = bk_1 - \frac{\Omega_0^3 JL_\delta}{Nk_s\Psi_s}.$$

Після перетворення виразу (7) одержимо наступне матричне рівняння

$$p\hat{X} = A\hat{X} + K(Y - C\hat{X}) + BU, \quad (11)$$

яке в скалярній формі записується так:

$$p\hat{\omega}_r = -\frac{3Nk_s\Psi_s}{2J}\hat{I}_{rv} - \frac{\hat{M}_c}{J} + k_1(I_{rv} - \hat{I}_{rv});$$

$$p\hat{I}_{rv} = \frac{Nk_s\Psi_s}{L_\delta}\hat{\omega}_r - \frac{R''}{L_\delta}\hat{I}_{rv} + k_2(I_{rv} - \hat{I}_{rv}) + \frac{U_{rv}}{L_\delta} - \frac{k_s}{L_\delta}U_{sv} - \frac{U_{pr}}{L_\delta};$$

$$p\hat{M}_c = -\frac{3Nk_s\Psi_s b}{2J}\hat{I}_{rv} - \frac{b}{J}\hat{M}_c + k_3(I_{rv} - \hat{I}_{rv}). \quad (12)$$

За системою рівнянь (12) будується структурна схема спостерігача і визначається його алгоритм роботи. Не всі збурення можливо вимірити або ввести в спостерігач. Також має місце деяка невідповідність між математичним описом об'єкта керування і спостерігача. Тому Ω_0 вибирають так, щоб швидкодія спостерігача була вище швидкодії системи керування, у колі зворотного зв'язку якої спостерігач знаходиться. Швидкодія об'єкта керування визначається його середнім геометричним коренем, який обчислюється за формулою:

$$\Omega_{об} = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} = Nk_s \Psi_s \sqrt{\frac{3}{2JL_\delta}}, \quad (13)$$

де a_0 і a_2 — коефіцієнти при ступенях p^2 і p^0 у характеристичному поліномі (2).

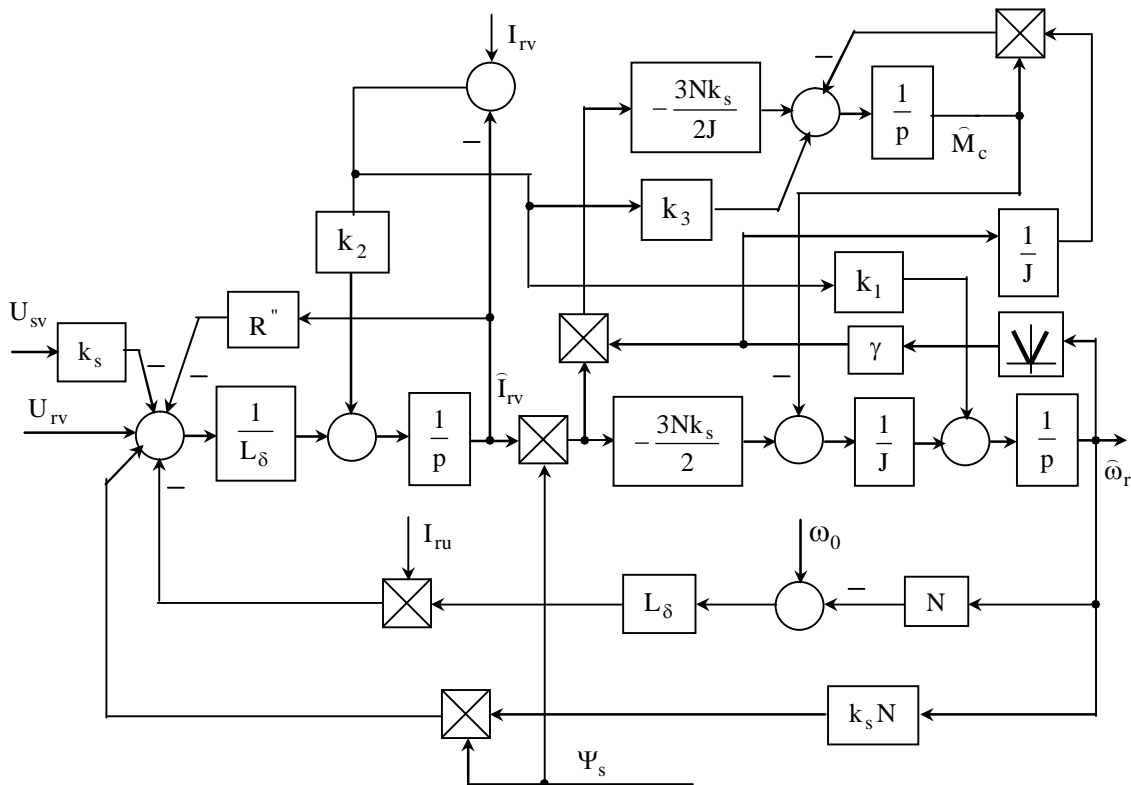


Рис. 1. Структурна схема спостерігача стану третього порядку, який оцінює момент статичного навантаження МПЖ

На рис. 1 показана структурна схема спостерігача, яка складена за системою рівнянь (12). Для корекції значень змінних спостерігача вимірюється активна складова струму ротора I_{rv} , яка порівнюється з змінною \hat{I}_{rv} , що обчислюється спостерігачем, та сигнал їх різниці через блоки коефіцієнтів підсилення (k_1, k_2, k_3) додається до входів інтеграторів спостерігача. При розбіжності значень змінних об'єкта і їх оцінок з'являється помилка ідентифікації струму I_{rv} і починають працювати коригувальні кола спостерігача. Зовнішні впливи U_{rv}, U_{sv}, U_{pr} вимірюються і подаються на вхід спостерігача. Швидкість обертання опорного вектора потокосцеплення статора ω_k замінюється значенням синхронної швидкості ω_0 , що робиться для спрощення структури спостерігача. Відношення $2(M_{сн} - M_0)/\omega_{гн}^2$ замінюється коефіцієнтом γ , а у виразі (5) швидкість ротора замінюється її оцінкою $\hat{\omega}_r$.

Блок виділення модуля необхідний для застосування спостерігача в МПЖ із реверсуванням швидкості по ротору. Якщо реверс здійснюється переключенням фаз статора, то необхідно ще змінити знак сигналу кругової частоти мережі ω_0 на протилежний. Як впливає з формул (10), коефіцієнти коригувальних зв'язків k_1 , k_2 і k_3 залежать від поточного значення швидкості ротора і швидкості статора. В перехідних режимах помилки оцінювання моменту навантаження будуть зменшуватися при більших значеннях Ω_0 . Однак процес збільшення Ω_0 обмежений, тому що відбувається зростання коефіцієнтів вектора K , що призводить до коливальності і далі до втрати стійкості замкненої через спостерігач системи керування.

Досліджувалися динамічні властивості спостерігача навантаження в складі релейно-векторної системи керування електроприводом, який виконаний за схемою МПЖ на основі асинхронної машини 4AK160S4Y3 з наступними паспортними даними: $P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_{лн} = 380 \text{ В}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $U_2 = 305 \text{ В}$. На рис. 2 наведені графіки перехідних процесів швидкості обертання ротора ω_r , модуля вектора потокозчеплення статора Ψ_s , електромагнітного моменту M_e й активної складової струму ротора I_{rv} . На вхід системи керування подавалися різні сигнали завдання швидкості, а як збурюючий вплив до вала МПЖ прикладалися різні значення моменту статичного навантаження. При цьому досліджувалася реакція спостерігача на стрибкоподібні зміни моменту навантаження і на перехідні процеси регулювання швидкості.

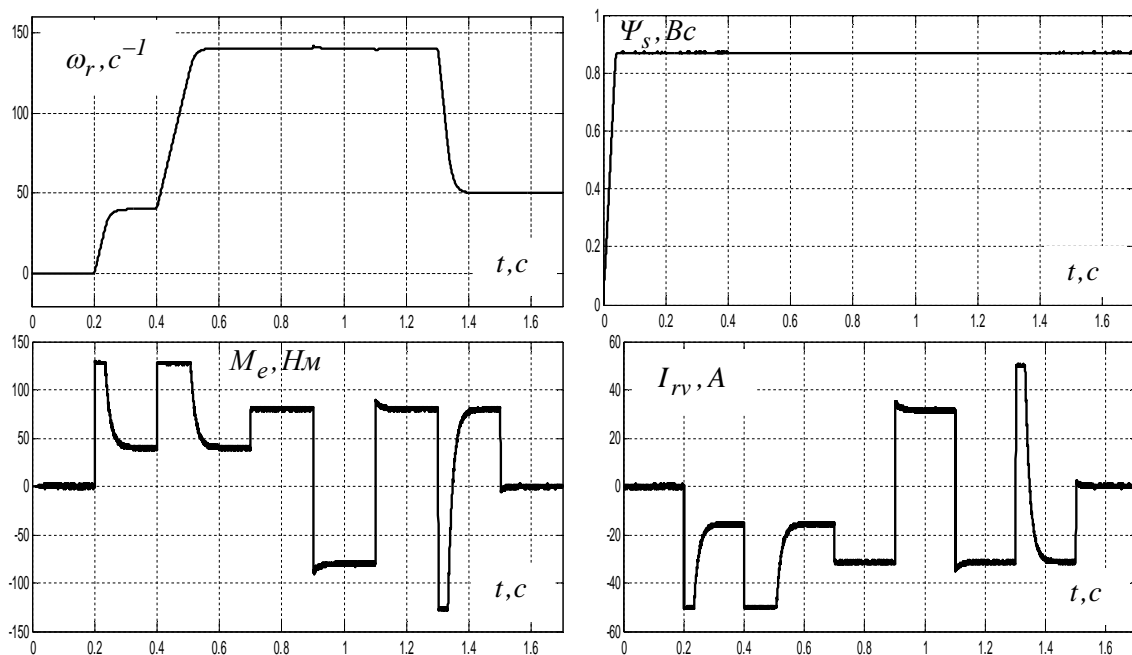


Рис. 2. Змінні стану МПЖ при регулюванні швидкості і стабілізації потокозчеплення

На рис. 3 представлені графіки моменту навантаження і його оцінки на виході спостерігача. Приймається біноміальний розподіл коренів характеристичного полінома спостерігача, оскільки при інших розподілах буде перерегулювання при визначенні моменту статичного навантаження у випадку його стрибкоподібної зміни. Якщо при синтезі спостерігача прийняти момент навантаження постійним, тобто $M_c = const$, то коефіцієнт b у рівняннях (12) буде дорівнювати нулю. Тоді в спостерігачі відсутній перехресний зв'язок за швидкістю і її зміна при розгонах і гальмуваннях не викликає динамічної помилки оцінювання моменту навантаження. Цьому випадку відповідають графіки на рис. 3, А). Якщо покласти механічну характеристику механізму вентиляторною, то коефіцієнт b буде змінюватися пропорційно швидкості відповідно до формули (5). Тоді перехресний зв'язок за швидкістю в спостерігачі приводить до появи динамічної помилки

оцінювання моменту навантаження спостерігачем при перехідних процесах у каналі регулювання швидкості. Збурення виникають у моменти часу 0.4 с і 1.3 с, коли починаються розгін і гальмування, що видно на рис. 3, Б). Середній геометричний корінь характеристичного рівняння спостерігача (12) приймається рівним $\Omega_0 = 4\Omega_{об}$, що підвищує швидкість спостерігача при відсутності перерегулювання, що у свою чергу забезпечується значеннями коефіцієнтів A_1, A_2 біноміального розподілу коренів характеристичного полінома спостерігача.

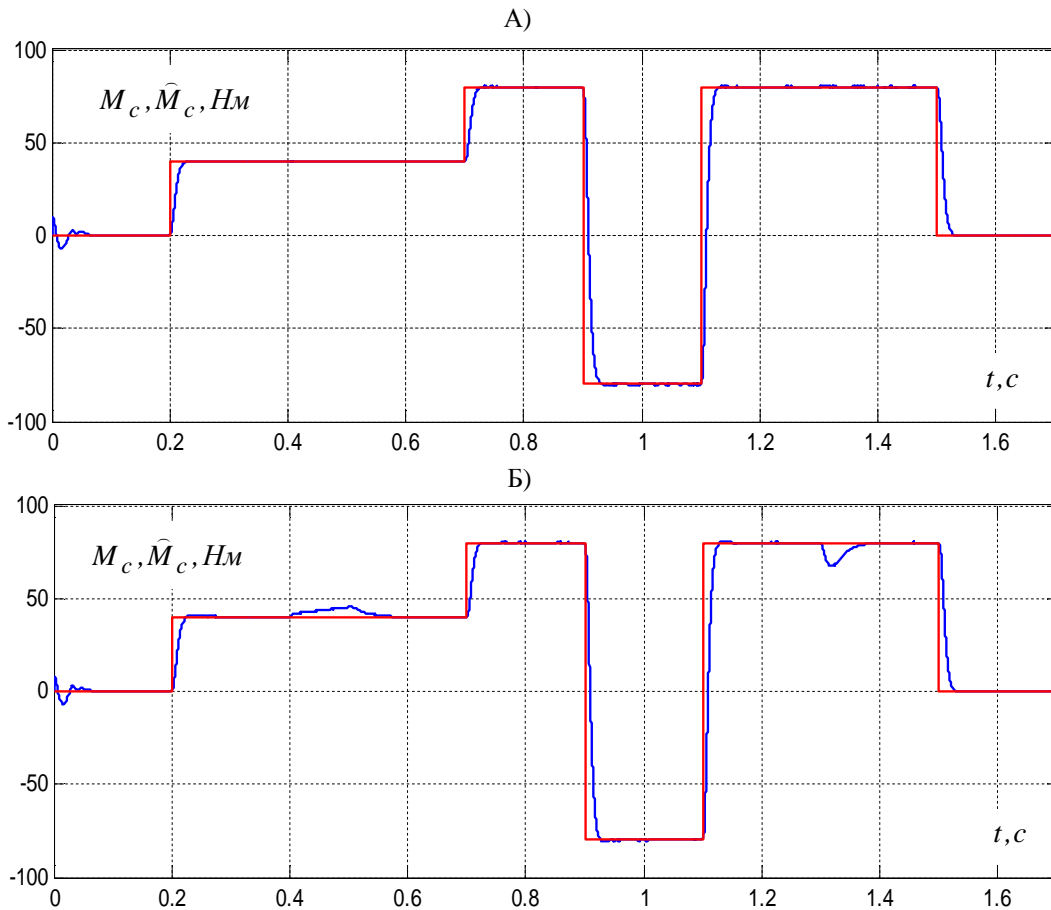


Рис. 3. Графіки стрибкоподібної зміни моменту навантаження на валу МПЖ (червона лінія) і розраховані спостерігачем оцінки моменту навантаження (синя лінія): А) — коефіцієнт b дорівнює нулю; Б) — коефіцієнт b визначається за формулою (5)

Висновки

У роботі з використанням методу модального керування, застосовуваного для лінійних систем, здійснений синтез нелінійного спостерігача стану в складі релейно-векторної системи керування МПЖ, що дозволяє обчислити оцінку моменту статичного навантаження на валу АМ. Синтез спостерігача здійснювався виходячи з допущення, що параметри АМ, які використовуються при обчисленні параметрів спостерігача, точно відомі і не змінюються в процесі експлуатації. Методом математичного моделювання підтверджена асимптотична стійкість спостерігача моменту навантаження на валу МПЖ, його достатня для цілей екстремального керування точність і швидкодія. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на пошук таких структур спостерігача, які будуть інваріантні до зміни визначених параметрів МПЖ.

Список використаної літератури

1. Peresada S., Tili A., Tonieli A. Power control of a doubly-fed induction machine via output feed back/ Control Engineering Practice, 2004. Vol. 12, No. 1. P. 41–57.
2. Ключев О.В., Садовой А.В. Асинхронный вентильный каскад как объект экстремального управления. Національний гірничий університет: Матеріали міжнародної конференції – Форум гірників, Том 2. Дніпропетровськ, 2005. С. 212–225.
3. Ключев О.В., Садовой А.В. Синтез контура регулювання потягощеплення по цепи статора в асинхронном вентильном каскаде. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. Кременчук: КДПУ, 2008. Вип. 4(51), ч. 2. С. 24–28.
4. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Системи керування асинхронними вентильними каскадами. Кам'янське: ДДТУ. 2018. 294 с.
5. Lu W., Zhang Z., Wang D., Lu K., Wu D., Ji K., Guo L. A New Load Torque Identification Sliding Mode Observer for Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(8), pp. 7852-7862. doi:10.1109/TPEL.2018.2881217
6. Karami-Mollaei A., Tirandaz H. Estimation of load torque in induction motors via dynamic sliding mode control and new nonlinear state observer. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(5), pp. 2283–2288. doi:10.1007/s12206-018-0439-7
7. Sun Y., Zhang H., Wang Y. Design of digital load torque observer in hybrid electric vehicle. *Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*. 2008, doi:10.1117/12.819610
8. Ammar A. Second-order sliding mode-direct torque control and load torque estimation for sensorless model reference adaptive system-based induction machine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2020, 235(1) P. 15–29. doi:10.1177/0959651820935694
9. Bukaros A. Y., Onyshchenko O. A., Montik P. N., Malyshev V. L., Bukaros V. N. Modernization of luenberger observer for control system of hermetic compressor electric drive. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2019, № 1. С. 230–237. doi: 10.15588/1607-3274-2019-21

SYNTHESIS OBSERVER OF THE LOAD TORQUE AS PART OF THE VECTOR CONTROL SYSTEM OF THE DOUBLY FED MACHINE

Abstract

The standard implementation of an asynchronous electric drive according to the scheme of a doubly fed machine is that the stator of the asynchronous machine is connected to the network, and the rotor circle is powered by a frequency converter. Extreme adjustment of the reactive power of the rotor doubly fed machine is carried out by the stator. At the same time, the objective function includes the moment of static load, which cannot be measured. Therefore, to determine the load moment an observer was developed, which is in the feedback loop of the vector control system of the doubly fed machine. The observer evaluates the moment of load on the shaft of the asynchronous machine during its sudden changes.

In the paper using the method of modal control the synthesis of the observer of static load on the shaft of the doubly fed machine was carried out. The synthesis is based on the equations of the active power channel of the doubly fed machine in the coordinate axes oriented along the stator flux coupling vector. The synthesis of the observer was carried out based on the assumption that the moment of load on the shaft of an asynchronous machine varies according to the fan characteristic. However, when one parameter is set to zero, the structure of the observer presented in the article can be used to calculate the constant moment of the load, including when it changes abruptly. The synthesis of the observer was carried out based on the assumption that the parameters of the asynchronous machine, which are used in the calculation of the parameters of the observer, are precisely known and do not change during operation.

The asymptotic stability of the observer of the load moment on the shaft of the doubly fed machine was confirmed by the method of mathematical modeling, and its accuracy and speed are sufficient for the purposes of extreme control. Further research can be aimed at finding such observer structures that will be invariant to changes in some parameters of the electric machine.

References

- [1] Peresada S.& Tili A. & Toneli A. (2004) *Power control of a doubly-fed induction machine via output feedback*. - Control Engineering Practice, Vol. 12, No. 1, pp. 41-57.
- [2] Klyuev O.V. & Sadovoi A.V. (2005) «*Asinhronniy ventilniy kaskad kak ob'ekt ekstremalnogo upravleniya*» [*Asynchronous valve cascade as an object of extreme control*]. National Mining University: Materials of the international conference - Miners' Forum, Volume 2, Dnipropetrovsk, s.212-225, [in Ukrainian].
- [3] Klyuev O.V.& Sadovoi A.V. (2008) «*Sintez kontura regulirovaniya potokostsepleniya po tsepi statora v asinhronnom ventilnom kaskade*» [*Synthesis of the flux linkage control loop along the stator circuit in an asynchronous valve cascade*]. Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University: Scientific Works of the KDPU. - Kremenchuk: KDPU, Issue 4(51), part 2, s.24-28, [in Ukrainian].
- [4] Klyuyev O.V.& Sadovoi O.V.& Sokhina Yu.V. (2018) *Systemy keruvannia asynkhronnyimi ventilynymi kaskadamy*. [Control systems of asynchronous valve cascades]. Kam'ianske: DDTU, 2018. – 294s. [in Ukrainian].
- [5] Lu W.& Zhang Z.& Wang D.& Lu K.& Wu D.& Ji K.& Guo L. (2019). *A New Load Torque Identification Sliding Mode Observer for Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System*. - IEEE Transactions on Power Electronics, 34(8), pp. 7852-7862. doi:10.1109/TPEL.2018.2881217
- [6] Karami-Mollaei A.& Tirandaz H. (2018). *Estimation of load torque in induction motors via dynamic sliding mode control and new nonlinear state observer*. - Journal of Mechanical Science and Technology, 32(5), pp. 2283–2288. doi:10.1007/s12206-018-0439-7
- [7] Sun Y. & Zhang H. & Wang Y. (2008). *Design of digital load torque observer in hybrid electric vehicle*. - Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements. doi:10.1117/12.819610
- [8] Ammar A. (2020). *Second-order sliding mode-direct torque control and load torque estimation for sensorless model reference adaptive system-based induction machine*. - Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 235(1) pp. 15–29. doi:10.1177/0959651820935694
- [9] Bukaros A. Y. & Onyshchenko O. A. & Montik P. N. & Malyshev V. L. & Bukaros V. N. (2019) *Modernization of luenberger observer for control system of hermetic compressor electric drive*. - Radio electronics, informatics, management, No. 1, pp. 230-237. doi: 10.15588/1607-3274-2019-21

Надійшла до редколегії 25.09.2023