

© О.В. Садовой¹, О.В. Ключев², Ю.В. Сохіна²

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧА МОМЕНТУ НАВАНТАЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

© O. Sadovoi¹, O. Kliuiev², Yu. Sokhina²

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

SYNTHESIS OF LOAD MOMENT OBSERVER ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH VECTOR CONTROL

Мета. Енергетичні характеристики асинхронних електроприводів у сталому режимі роботи є функціями трьох змінних: кутової швидкості обертання ротора, модуля орієнтуючого вектора потокозчеплення ротора і моменту статичного навантаження. Момент статичного навантаження є зовнішнім збурюючим впливом, ефективні методи виміру якого відсутні. Тому, метою даної роботи встановлено математичне описання спостерігача змінних стану каналу активної потужності і моменту навантаження на валу асинхронного електроприводу з векторним керуванням.

Методика. Для досягнення мети роботи застосована методика синтезу модальних спостерігачів з використанням полеорієнтованої моделі асинхронної машини з декомпозицією її рівнянь і врахуванням нелінійностей перехресних зв'язків між каналами керування.

Результати. В складі релейно-векторної системи керування синтезований модальний спостерігач моменту навантаження, інформація з виходу якого може використовуватися для побудови алгоритмів екстремального керування асинхронним електроприводом. Методом математичного моделювання доведена асимптотична стійкість і достатня точність спостерігача моменту навантаження при різних розподілах коренів його характеристичного рівняння.

Наукова новизна. У роботі розв'язана актуальна наукова задача встановлення закономірностей структурно-алгоритмічного синтезу та настроювання модального спостерігача моменту навантаження на валу асинхронного електропривода. Ідентифікація моменту навантаження на валу електричної машини дозволить підвищити якісні показники систем екстремального керування асинхронними електроприводами.

Практична значимість. Отримані рівняння спостерігача визначають алгоритм ідентифікації моменту навантаження, інформацію про який можливо використовувати в двоканальних системах векторного керування асинхронними електроприводами для побудови зовнішнього контуру екстремального керування, завдяки якому досягається поліпшення енергетичних показників асинхронної машини. В першу чергу мова йде про мінімізацію втрат активної потужності або споживання реактивної потужності асинхронною машиною при зміні моменту навантаження на її валу.

Ключові слова: асинхронна машина, векторне керування, модальний спостерігач моменту навантаження, асимптотична стійкість, розподіл коренів характеристичного полінома.

Вступ. Структура системи векторного керування асинхронною машиною з постійним потокозчепленням може виявитися нераціональною, тому що стабілізація системою керування модуля орієнтуючого вектора потокозчеплення на рівні номінального значення приводить до зниження коефіцієнта потужності при моментах навантаження електропривода менше номінального. Зазначений недолік притаманний регульованим електроприводам навантажувальних машин з вентилляторною механічною характеристикою. Аналітичні вирази, які дозволяють визначити значення потокозчеплення ротора асинхронного електропривода (ЕП), при якому його енергетичні характеристики досягають екстремуму, отримані в [1, 2]. Поліпшити енергетичні показники асинхронного електропривода з керуванням за статором можливо, змінюючи потокозчеплення ротора у функції моменту навантаження на валу асинхронної машини (АМ) [3]. Для оптимізації енергетичних процесів у такому ЕП необхідно побудувати двоканальну систему з незалежним керуванням швидкістю і потокозчепленням ротора АМ, що можливо реалізувати у векторній полеорієнтованій системі керування з додаванням у її склад контура екстремального регулювання. Метою регулювання приймається досягнення екстремуму деякої функції мети, яка описує енергетичні характеристики АМ [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Необхідність обчислення моменту навантаження на валу електричної машини виникає в електроприводах різного призначення. В даний час існує ряд підходів до оцінки моменту навантаження в електроприводі. Класичне рішення – оцінка моменту навантаження за струмом якоря електропривода [4]. Фактично дане питання складається в непрямої оцінці електромагнітного моменту і застосовується лише в сталому режимі роботи ЕП. Для визначення положення кінематичних ланок може бути використана оцінка деформаційних зсувів у шарнірах під впливом моментів навантаження, що фіксуються в електроприводах. Дана задача актуальна для робототехнічних систем, до яких пред'являються високі вимоги до динамічної точності. У працях [5, 6] реалізований підхід, у якому оцінка моменту навантаження проводиться за різницею двох значень швидкості електропривода: обмірюваної і відновленої спостерігачем стану. У даному підході оцінка моменту навантаження виконується опосередковано через оцінку швидкості, а якість оцінки залежить від знання параметрів моделі електропривода. Вектор стану асинхронної машини можна оцінювати за допомогою спостерігача Люєнбергера [7] або алгоритму розширеного фільтра Калмана [8]. Інший підхід представлений у роботах [9, 10], де відновлення моменту навантаження виконується за даними електромагнітного моменту і прискорення вала двигуна, що безпосередньо впливає з рівняння руху ЕП. Однак вимір прискорення або його оцінка часто викликає труднощі, пов'язані з вірогідністю і наявністю шумів в обмірюваному сигналі. Для відновлення сигналу прискорення можливо використовувати спостерігач швидкості [11]. У статті [12] запропоноване астатичне регулювання швидкості, яке реалізується з використанням принципу комбінованого керування з позитивним зворотним зв'язком за збуренням, у якості якого використовують коригувальний сигнал оцінки моменту статичного опору. У роботі [13] синтезований спостерігач з

ковзним режимом, який асимптотично оцінює невідомий момент навантаження і визначає момент інерції ЕП на основі синхронного двигуна з постійними магнітами. У [14] представлена методика синтезу спостерігача механічної швидкості і моменту навантаження у високошвидкісних асинхронних ЕП рухливого складу. Такий спостерігач використовується з метою діагностики датчиків швидкості та моменту і забезпечує роботу ЕП у випадку несправності фізичних датчиків.

Формулювання мети дослідження. З проведеного аналізу останніх досліджень і публікацій випливає, що енергетичні характеристики асинхронних ЕП у сталому режимі роботи є функціями трьох змінних: кутової швидкості обертання ротора, модуля вектора потокозчеплення ротора і моменту статичного навантаження. Кутова швидкість ротора і потокозчеплення відносяться до змінних стану АМ і вони підлягають виміру. Момент статичного навантаження є зовнішнім збурюючим впливом, ефективні методи виміру якого відсутні. Тому якщо для поліпшення енергетичних показників АМ потрібно регулювати її реактивну потужність у функції моменту навантаження на валу, то потрібно синтезувати спостерігач, який би визначав оцінку моменту навантаження на валу АМ у процесі регулювання й експлуатації ЕП. Для реалізації контурів екстремального регулювання в складі векторних систем керування асинхронними електроприводами необхідна інформація про момент навантаження на валу асинхронної машини. В [3] запропонований модальний спостерігач моменту навантаження, який працює в контурі екстремального регулювання електроприводом турбомеханізму, у якого момент навантаження змінюється плавно у функції швидкості. Але докладно властивості спостерігача при стрибкоподібних змінах навантаження при різних швидкостях обертання ротора АМ не досліджувалися. Тому у даній роботі ставиться задача застосувати методику синтезу модальних спостерігачів для побудови і дослідження математичної моделі спостерігача змінних стану каналу активної потужності та моменту навантаження на валу асинхронного ЕП з векторним керуванням.

Виклад основного матеріалу. Вихідними для синтезу спостерігача служать рівняння АМ у формі Коші, записані в осях координат, орієнтованих за вектором потокозчеплення ротора [2]:

$$\begin{aligned}
 p\Psi_r &= -\frac{\Psi_r}{T_r} + \frac{L_m}{T_r} I_{su}; \\
 pI_{su} &= -\frac{R'}{L'_s} I_{su} + \frac{K_r}{T_r L'_s} \Psi_r + N\omega_r I_{sv} + K_r R_r \frac{I_{sv}^2}{\Psi_r} + \frac{U_{su}}{L'_s}; \\
 p\omega_r &= \frac{3NK_r \Psi_r}{2J} I_{sv} - \frac{M_c}{J}; \\
 pI_{sv} &= -\frac{R'}{L'_s} I_{sv} - \frac{K_r N \Psi_r}{L'_s} \omega_r - N\omega_r I_{su} - K_r R_r \frac{I_{su} I_{sv}}{\Psi_r} + \frac{U_{sv}}{L'_s}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Як видно з рівнянь (1) АМ є багатозв'язною системою, оскільки характеризується нелінійними зв'язками між каналами керування і нелінійними залежностями між регульованими змінними. Кожній регульованій величині можна поставити у відповідність свій регулятор і тим самим визначити в об'єкті керування прямі канали передачі впливів. Аналіз системи рівнянь (1) показує, що АМ як об'єкт регулювання складається з двох взаємозалежних контурів. Зв'язок між контурами керування активною і реактивною потужностями обумовлений чотирма внутрішніми перехресними зв'язками в АМ: двох перехресних зв'язків через потоки розсіювання $L'_s \omega_r I_{su}$, $L'_s \omega_r I_{sv}$, перехресний зв'язок через ЕРС обертання $K_r \omega \Psi_r$ і перехресний зв'язок через електромагнітний момент $1,5NK_r \Psi_r I_{sv}$. Стабілізація модуля вектора потокозчеплення ротора однозначно визначає залежність електромагнітного моменту АМ від активної складової струму статора I_{sv} й одночасно лінеаризує ланки формування електромагнітного моменту і зворотного зв'язку за ЕРС двигуна. Перехресні зв'язки через потоки розсіювання розглядаються як збурюючі впливи в каналах керування активною і реактивною потужностями АМ.

У контур екстремального регулювання необхідно подавати величину статичного моменту M_c , оскільки вирази функцій мети виходять з рівнянь сталого режиму роботи ЕП, при якому електромагнітний момент дорівнює моменту статичного навантаження. Однак момент статичного навантаження на валу АМ не піддається приладовому виміру. До того ж для реалізації релейного регулятора швидкості потрібно організувати зворотний зв'язок за її першою похідною. Пряме диференціювання сигналу з виходу датчика швидкості, який неминуче містить високочастотну складову перешкоди, сполучено з великими технічними труднощами. Для розв'язання зазначених задач, які виникають при технічній реалізації системи екстремального керування АМ, необхідно застосувати пристрій спостереження, ідентифікуючий не тільки змінні стану об'єкта керування, але і недоступні прямому виміру зовнішні впливи.

Спостерігач стану будується на основі відомої структури і параметрів лінійного об'єкта. Початкові значення векторів стану об'єкта керування і спостерігача повинні бути однаковими, а вхідні впливи прикладаються одночасно до реального об'єкта і до спостерігача. Підсистема, яка описує динамічні процеси в каналі керування активною складовою струму статора АМ, складається з третього і четвертого рівнянь системи (1), які записуються окремо і мають вигляд:

$$\begin{aligned} p\omega_r &= \frac{3NK_r\Psi_r}{2J}I_{sv} - \frac{M_c}{J}; \\ pI_{sv} &= -\frac{K_r N\Psi_r}{L'_s}\omega_r - \frac{R'}{L'_s}I_{sv} + \frac{U_{sv}}{L'_s} - \frac{U_{pr}}{L'_s}, \end{aligned} \quad (2)$$

де U_{sv} – активна складова напруги статора; $U_{pr} = \left(\frac{R_r K_r I_{sv} I_{su}}{\Psi_r} + N\omega_r I_{su} \right) L'_s$ – сигнал перехресного зв'язку; M_c – момент статичного навантаження на валу.

Для моделі каналу активної потужності АМ (2) змінні U_{sv} , U_{pr} служать вхідними сигналами, а величина M_c – збурюючим впливом. Тоді характеристичне рівняння об'єкта (2) визначиться в такий спосіб

$$\begin{vmatrix} p & -\frac{3NK_r\Psi_r}{2J} \\ \frac{NK_r\Psi_r}{L'_s} & p + \frac{R'}{L'_s} \end{vmatrix} = p^2 + \frac{R'}{L'_s} p + \frac{3N^2 K_r^2 \Psi_r^2}{2JL'_s}. \quad (3)$$

Формуючи вектор стану, введемо позначення $x_1 = \omega_r$, $x_2 = I_{sv}$. Оскільки збурення моментом навантаження M_c не може бути обмірюване і введене в пристрій спостереження, то воно розглядається як одна із змінних стану $x_3 = M_c$ розширеного в такий спосіб об'єкта керування. Якщо робочий орган має вентиляторну механічну характеристику, то завжди, хоча б приблизно, можна записати її аналітичний вираз у наступному вигляді

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega_r}{\omega_{rн}} \right)^2, \quad (4)$$

де M_c – момент опору виробничого механізму при швидкості ω_r ; M_0 – момент тертя в частинах, які рухаються; $M_{сн}$ – момент опору механізму при номінальній швидкості обертання $\omega_{rн}$.

Диференціюючи (4) за часом з використанням першого виразу системи (2), одержимо наступне рівняння, яке зв'язує зовнішній вплив M_c із змінними стану об'єкта (2):

$$pM_c = -\frac{3NK_r\Psi_r b}{2J} I_{sv} - \frac{b}{J} M_c, \quad (5)$$

де $b = \frac{2(M_{сн} - M_0) \omega_r}{\omega_{rн}^2}$ – коефіцієнт, який змінюється пропорційно швидкості обертання ротора.

Якщо вираз (5) додати до системи (2), то рівняння динаміки розширеного об'єкта керування у векторно-матричній формі буде мати вигляд

$$\begin{aligned} pX &= AX + BU; \\ Y &= CX, \end{aligned} \quad (6)$$

де X – вектор стану об'єкта; U – вектор вимірюваних вхідних впливів; A і B – матриці стану і входу; Y – вектор вимірюваних вихідних змінних і матриця виходу C , знаходяться як:

$$X = \begin{pmatrix} \omega_r \\ I_{sv} \\ M_c \end{pmatrix}; U = \begin{pmatrix} U_{sv} \\ U_{pr} \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{3NK_r\Psi_r}{2J} & -\frac{1}{J} \\ -\frac{NK_r\Psi_r}{L_s'} & -\frac{R'}{L_s'} & 0 \\ 0 & \frac{3NK_r\Psi_r b}{2J} & -\frac{b}{J} \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_s'} & -\frac{1}{L_s'} \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$Y = I_{sv}; C = (0 \quad 1 \quad 0).$$

Ранг матриці спостереження $Q = [C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T]$ дорівнює порядку системи (6) $n = 3$, тобто розширений об'єкт повністю спостерігається і задача оцінки його стану має розв'язання.

Спостерігаючий пристрій описується рівнянням

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

де X – відновлений спостерігачем вектор стану об'єкта; K – вектор коефіцієнтів коригувальних зв'язків спостерігача.

Вибір елементів вектора модального зворотного зв'язку $K = (k_1 \quad k_2 \quad k_3)^T$ означає завдання визначеного вигляду характеристичного рівняння спостерігача, яке записується в такий спосіб

$$\det[pI - (A - KC)] = \begin{vmatrix} p & -\frac{3NK_r\Psi_r}{2J} + k_1 & \frac{1}{J} \\ \frac{NK_r\Psi_r}{L_s'} & p + \frac{R'}{L_s'} + k_2 & 0 \\ 0 & -\frac{3NK_r\Psi_r b}{2J} + k_3 & p + \frac{b}{J} \end{vmatrix} = p^3 + \left(\frac{R'}{L_s'} + \frac{b}{J} + k_2\right)p^2 +$$

$$+ \left(\frac{3N^2 K_r^2 \Psi_r^2}{2J L_s'} - \frac{NK_r \Psi_r k_1}{L_s'} + \frac{bR'}{J L_s'} + \frac{bk_2}{J}\right)p + \frac{NK_r \Psi_r k_3}{J L_s'} - \frac{NK_r \Psi_r b k_1}{J L_s'}.$$

(8)

Для додання спостерігачу бажаних динамічних властивостей задамося стандартною поліноміальною формою розподілу коренів характеристичного рівняння 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 – середньгеометричний корінь (СГК) характеристичного рівняння спостерігача.

Коефіцієнти A_1 і A_2 визначають розміщення коренів характеристичного рівняння спостерігача на комплексній площині. Для розподілу за Батервортом маємо $A_1 = A_2 = 2$, за Ньютоном – $A_1 = A_2 = 3$. З порівняння співмножників при однакових степенях оператора p в рівняннях (8) і (9) знаходяться аналітичні вирази для коефіцієнтів вектора K зворотних зв'язків спостерігача:

$$\begin{aligned}
 k_2 &= A_1 \Omega_0 - \frac{R'}{L'_s} - \frac{b}{J}; \\
 k_1 &= \frac{3NK_r \Psi_r}{2J} + \frac{bR'}{JNK_r \Psi_r} + \frac{bL'_s k_2}{JNK_r \Psi_r} - \frac{A_2 \Omega_0^2 L'_s}{NK_r \Psi_r}; \\
 k_3 &= bk_1 + \frac{\Omega_0^3 J L'_s}{NK_r \Psi_r}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Перетворивши матричне рівняння спостерігача (7), одержимо рівняння

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

яке для кожної координати окремо записується так:

$$\begin{aligned}
 p\hat{\omega}_r &= \frac{3NK_r \Psi_r}{2J} \hat{I}_{sv} - \frac{\hat{M}_c}{J} + k_1 (I_{sv} - \hat{I}_{sv}); \\
 p\hat{I}_{sv} &= -\frac{NK_r \Psi_r}{L'_s} \hat{\omega}_r - \frac{R'}{L'_s} \hat{I}_{sv} + k_2 (I_{sv} - \hat{I}_{sv}) + \frac{U_{sv}}{L'_s} - \frac{U_{pr}}{L'_s}; \\
 p\hat{M}_c &= \frac{3NK_r \Psi_r b}{2J} \hat{I}_{sv} - \frac{b}{J} \hat{M}_c + k_3 (I_{sv} - \hat{I}_{sv}).
 \end{aligned} \tag{12}$$

Система (12) визначає структуру пристрою спостереження і його алгоритм роботи.

На об'єкт керування завжди діють збурення, які неможливо виміряти і ввести в спостерігач, а також може мати місце деяка невідповідність між математичним описом об'єкта керування і спостерігача, тому рекомендується вибирати Ω_0 так, щоб швидкодія спостерігача була трохи вище швидкодії тієї системи, яка містить спостерігач у колі зворотного зв'язку. Швидкодія об'єкта керування визначається його СГК, який знаходиться за формулою

$$\Omega_{об} = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} = NK_r \Psi_r \sqrt{\frac{3}{2JL'_s}}, \tag{13}$$

де a_0 і a_2 – коефіцієнти при p^2 і p^0 характеристичного рівнянні (3), причому приймається $\Omega_0 = (2 \dots 3)\Omega_{об}$ [15].

Структурна схема спостерігача, складена відповідно до системи рівнянь (12), показана на рисунку 1. Для корекції значень поточних змінних спостерігача моменту навантаження контролюється активна складова струму статора I_{sv} , яка порівнюється з аналогічною змінною, обчислюваною спостерігачем \hat{I}_{sv} , та їх різниця через блоки коригувальних зворотних зв'язків (k_1, k_2, k_3) подається на входи інтеграторів спостерігаючого пристрою. При розбіжності значень змінних стану об'єкта керування та їх оцінок працює коригувальне коло спостерігача, тому що з'являється помилка ідентифікації струму I_{sv} . Зовнішній вплив U_{sv} вимірюється і подається на вхід спостерігача.

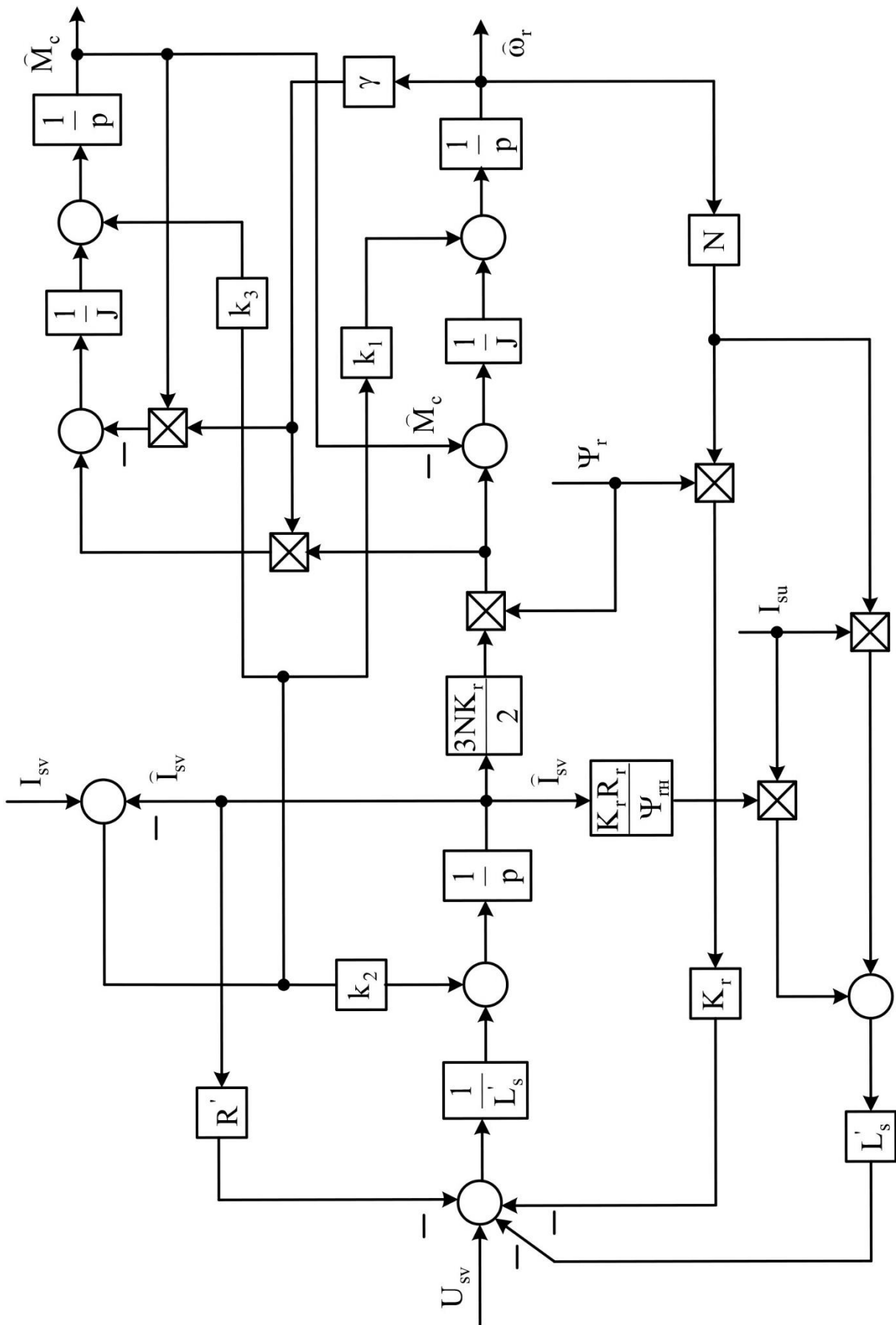


Рис.1. Структурна схема спостерігача стану каналу активної потужності асинхронної машини

Для спрощення структури спостерігача при визначенні сигналу перехресного зв'язку через потоки розсіювання U_{pr} струм статора I_{sv} замінюється його оцінкою \hat{I}_{sv} , а замість ділення на модуль потоку ротора Ψ_r береться його номінальне значення Ψ_{rn} . У виразі для коефіцієнта b замість швидкості обертання ротора використовується її оцінене значення $\hat{\omega}_r$, а коефіцієнт $\gamma = 2(M_{сн} - M_0)/\omega_{rn}^2$.

Як видно з формул (10), коефіцієнти зв'язків k_1, k_2, k_3 , які підстроюють спостерігач під об'єкт керування, залежать від Ω_0 і змінюються у функції потоку ротора і оцінки швидкості його обертання. Динамічні помилки оцінювання змінних стану об'єкта керування будуть тим менші, чим більше величина Ω_0 . Однак можливості збільшення Ω_0 обмежені, тому що воно спричиняє зростання коефіцієнтів вектора K , що призведе до коливальності і далі до втрати стійкості системи керування, замкненої через спостерігач.

Динаміка спостерігача моменту навантаження, прикладеного до валу асинхронного електроприводу, з системою векторного керування досліджена з використанням математичної моделі, створеної в Matlab/Simulink на прикладі електропривода, виконаного на основі асинхронної машини типу 4A132M4У3 з наступними технічними даними: $P_n = 11$ кВт, $U_{sl} = 380$ В; $n_n = 1460$ об/хв. На рисунках 2 і 3 зображені перехідні процеси: на рисунку 2 представлені змінні стану ЕП, а на рисунку 3 – момент навантаження на валу АМ як збурюючий вплив, що діє на ЕП, та його оцінка, яка розраховується синтезованим спостерігачем. З графіків на рисунку 2 видно, що релейно-векторна система керування відпрацьовує різні рівні стабілізації швидкості при різних моментах навантаження на валу АМ, що робиться для тестування динамічних властивостей спостерігача при оцінюванні моментів навантаження, які стрибкоподібно змінюються при різних швидкостях. На графіках рисунку 2 зображується збудження АМ при нерухомому роторі шляхом наростання модуля вектора потокозчеплення ротора до його номінального значення і стабілізації на цьому рівні при всіх подальших режимах роботи відповідним релейним регулятором у каналі реактивної потужності. При цьому релейний регулятор реактивної складової струму статора I_{su} підпорядкований регулятору модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_r .

Після того, як стабілізували потокозчеплення ротора на номінальному рівні, починається процес розгону АМ регулюванням в каналі активної потужності, структура якого визначається підпорядкуванням релейному регулятору швидкості обертання ротора ω_r регулятора активної складової струму статора I_{sv} . Стабілізація динамічного моменту відбувається регулятором активної складової струму статора I_{sv} шляхом обмеження його значення в перехідних процесах. В міру зростання швидкості збільшується момент навантаження на валу АМ, який відслідковується спостерігачем стану каналу активної потужності в результаті розв'язання в реальному часі системи рівнянь (12). На рисунку 3А представлена динаміка спостерігача навантаження при розподілі коренів характеристичного полінома за Батервортом, а на рисунку 3Б – розраховані перехідні процеси в спостерігачі при розподілі коренів його характеристичного рівняння за біномом Ньютона. У моменти часу 0.65с, 1.4с і 2с відбуваються накиди моментів навантаження різних знаків на вал АМ. Ці фактичні значення моменту навантаження

на валу АМ показані на рисунку 3 синьою лінією. Червоною лінією (цифра 1) представлені перехідні процеси відпрацьовування спостерігачем стану збурення за каналом моменту навантаження. З порівняння графіків, позначених цифрою 1, на рисунку 3 видно, що при відпрацьовуванні збурення за каналом навантаження спостерігачем моменту з розподілом коренів за Батервортом відбувається невелике перерегулювання, у той час як при розподілі коренів за біномом Ньютона перерегулювання відсутні. Усі накиди навантаження здійснювалися при застabilізованих швидкостях обертання ротора.

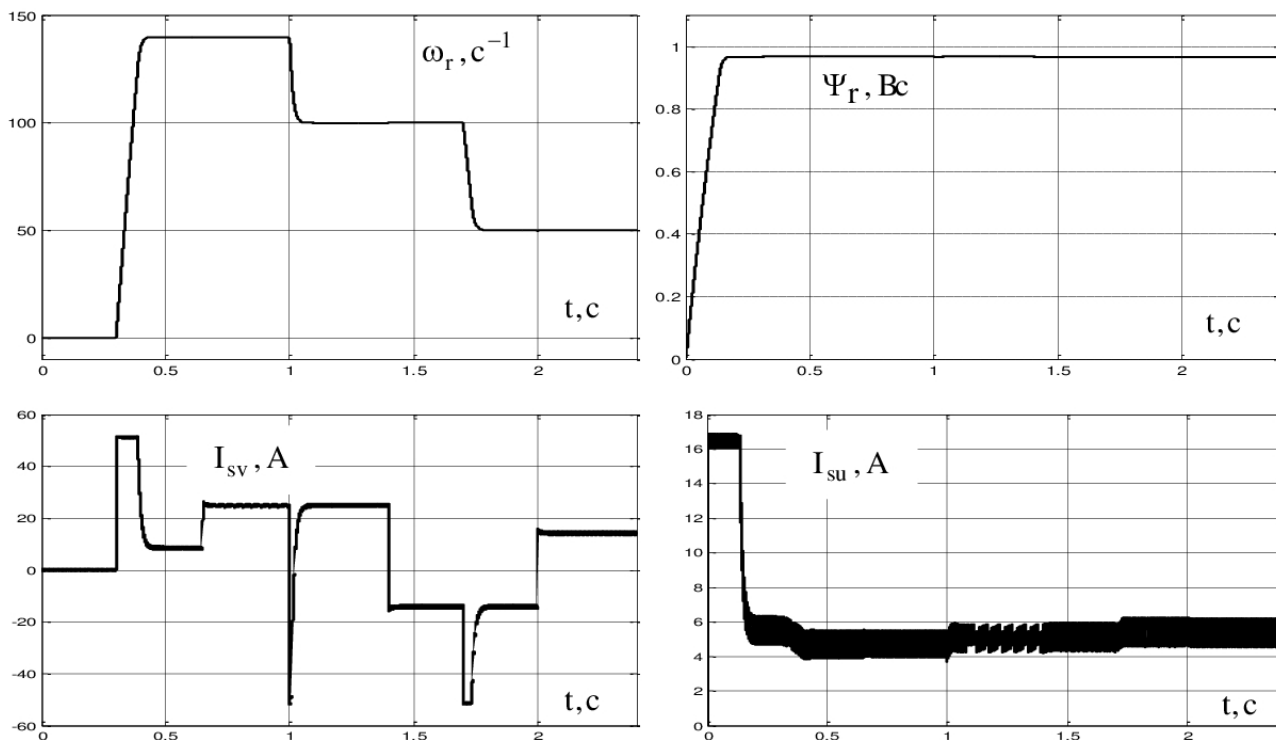


Рис. 2. Змінні стану асинхронного електроприводу з векторним керуванням і спостерігачем моменту навантаження АМ

Якість оцінювання спостерігачем моменту навантаження не залежить від рівня стабілізації швидкості. Однак коефіцієнти підстроювання k_1, k_2, k_3 спостерігача через коефіцієнт b (формули (10)) залежать від швидкості ротора АМ. Тому, коли в каналі активної потужності починаються перехідні процеси регулювання швидкості ротора в моменти часу 1с та 1.7с, то з'являються короточасні динамічні помилки оцінювання моменту навантаження спостерігачем. Далі помилки оцінювання моменту навантаження прямують до нуля за рахунок того, що зміна коефіцієнтів k_1, k_2, k_3 при регулюванні швидкості не порушує асимптотичної стійкості спостерігача. Більш того, коефіцієнти k_1, k_2, k_3 в функції швидкості змінюються таким чином, що розподіл коренів характеристичного рівняння спостерігача, заданий коефіцієнтами A_1 і A_2 , також не змінюється при різних швидкостях обертання ротора, що підтверджується однаковою формою перехідного процесу оцінювання моменту навантаження при різних рівнях стабілізації швидкості ротора АМ. Представлений на рисунку 1 спостерігач дозволяє також оцінити

швидкість ротора та її першу похідну.

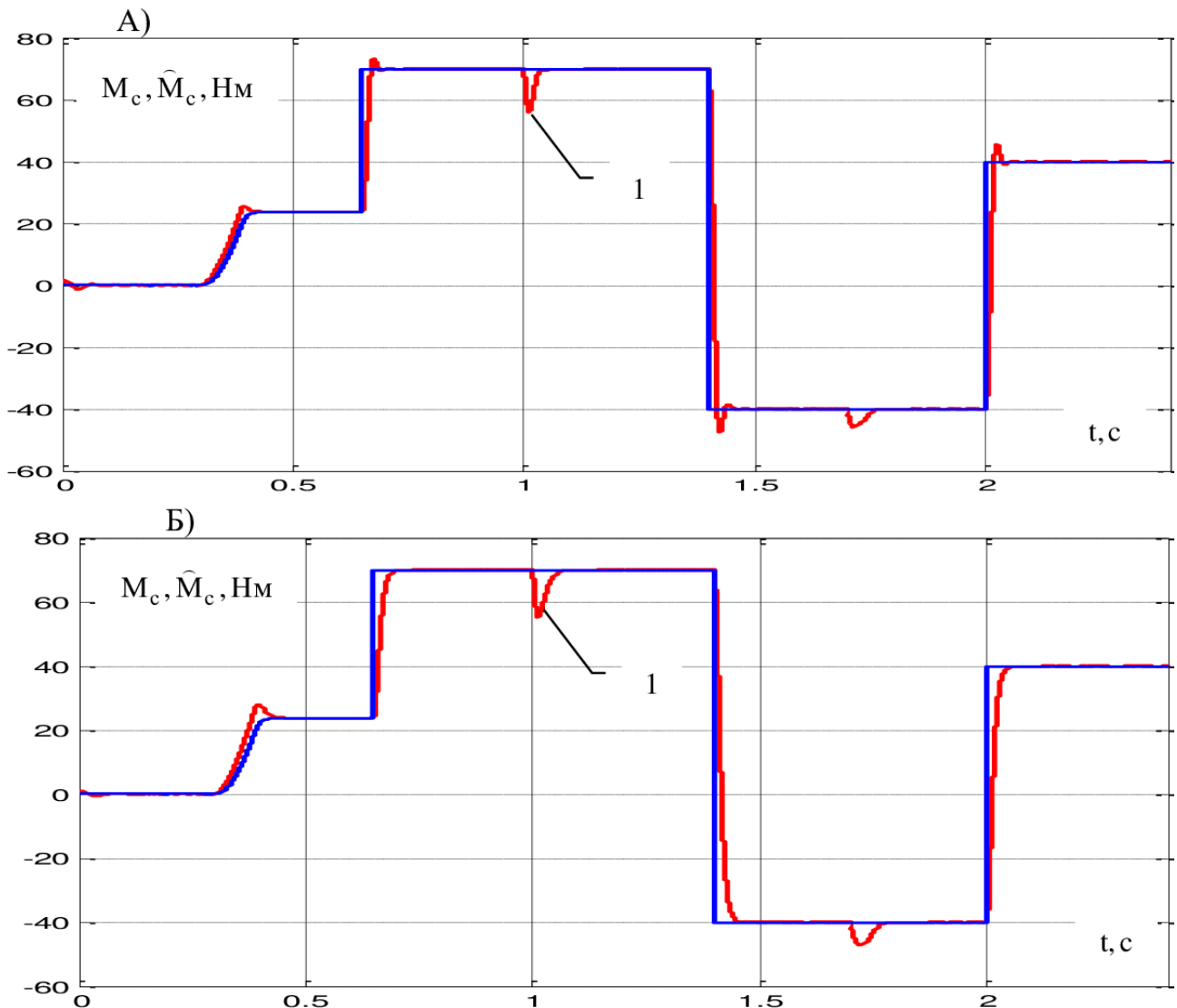


Рис. 3. Сигнал оцінки моменту статичного навантаження на виході спостерігача (червоний графік, цифра 1) і фактичний момент навантаження на валу асинхронної машини (синій графік): А – розподіл коренів характеристичного полінома спостерігача за Батервортом; Б – розподіл коренів характеристичного полінома спостерігача за біномом Ньютона

Висновки. У даній роботі розв’язана задача синтезу модального спостерігача стану каналу активної потужності асинхронного електропривода з векторним керуванням для ідентифікації моменту навантаження на валу асинхронної машини. На математичній моделі досліджена динаміка спостерігача моменту навантаження при різних швидкостях ротора АМ і стрибкоподібних змінах моменту опору на його валу. За рахунок залежності від швидкості виразів (10) для визначення елементів вектора модального зворотного зв’язку K , отриманий спостерігач (10), (12) можна вважати нелінійним. Проте, елементи вектора коригувальних зворотних зв’язків K змінюються таким чином, що спостерігач моменту

навантаження зберігає незмінними перехідні характеристики, задані стандартними поліноміальними формами при різних рівнях стабілізації швидкості.

Перелік посилань

1. Klyuev, O.V., & Sadovoi, A.V. (2011). Energeticheskie kharakteristiki asinkhronnogo elektroprivoda s dvukhkanalnoi sistemoi upravleniya. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprodzerzhynskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, 2(17), 174–181.
2. Ключев, О. В., Садовой, О. В., & Сохіна, Ю. В. (2018). *Системи керування асинхронними вентилями каскадами: монографія*. Кам'янське.
3. Sadovoi, A.V., Klyuyev, O. V., Sokhina, Yu. V., & Filin, I. V. (2020). Information system of minimization consumption reactive power in asynchronous electric drive with vector control. *Applied aspects of information technology*, 3(2), 74–84.
<https://doi.org/10.15276/aait.02.2020.5>
4. Choi, S.H., Ko, J.S., Kim, I.D., Park, J.S., & Hong, S.C.(2005). Precise position control using a PMSM with a disturbance observer containing a system parameter compensator. *IEEE Proceedings on Electric Power Applications*, 152(6), 1573–1577.
<https://doi.org/10.1049/ip-epa:20045200>
5. Hamida, M.A., De Leon, J., Glumineau, A., & Boisliveau, R. (2013). An Adaptive Interconnected Observer for Sensorless Control of PM Synchronous Motors with Online Parameter Identification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(2), 739–748.
<https://doi.org/10.1109/tie.2012.2206355>
6. Liu, T.H., Pu, H.T., & Lin, C.K. (2010). Implementation of an adaptive position control system of a permanent-magnet synchronous motor and its application. *Electric Power Applications, IET*, 4(2), 121–130.
<https://doi.org/10.1049/iet-epa.2009.0036>
7. Jouili, M., Jarray, K., Koubaa, Y., & Boussak, M. (2012). Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives. *Electric Power Systems Research*, 89, 139–147.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.02.014>.
8. Alonge, F., D'Ippolito, F., Fagiolini, A., & Sferlazza, A. (2014). Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor. *Control Engineering Practice*, 27, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.007>.
9. Chin-Chih, O., Chun-Jung, C., & Tien-Chi, C. (2010). Modelling and design a power assisted wheelchair used torque observer. *International Symposium Computer Communication Control and Automation*, 2, 63–66.
<https://doi.org/10.1109/3ca.2010.5533763>
10. Ki-Hong, P., Tae-Sung, K., Sung-Chan, A., & Dong-seok, H. (2003) Speed control of high-performance brushless DC motor drives by load torque estimation. *IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference*. 4, 1677–1681.
<https://doi.org/10.1109/pesc.2003.1217709>
11. Lee, K., Choy, I., & Back, J. (2011) Disturbance observer based sensorless speed controller for PMSM with improved robustness against load torque variation. *IEEE 8th International Conference Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE)*, 2537–2543.
<https://doi.org/10.1109/icpe.2011.5944734>.
12. Толочко, О.І., Чекавський, Г.С., Розкар'яка, П.І., & Журов, І.О. (2013) Спрощені спостерігачі для відновлення статичної та динамічної складових електромагнітного моменту асинхронного двигуна в системах частотно-регульованого електропривода. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика, 36 (1009), 75–79.

13. Lu, W., Zhang, Z., & Wang, D. (2019) A new load torque identification sliding mode observer for permanent magnet synchronous machine drive system. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 34(8), 7852-7862.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2881217>
14. Guzinski, J., Diguët, M., Krzeminski, Z., & Lewicki, A. (2010) Speed and load torque observer application in high-speed train electric drive. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 57(2), 565-574.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2029582>
15. Попович, М.Г., Лозинський, О.Ю., & Клепіков, В.Б. (2005) *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навчальний посібник*. Київ.

ABSTRACT

Purpose. The energy characteristics of asynchronous electric drives in steady-state operation are functions of three variables: the angular speed rotation of the rotor, the module of the vector flux coupling of the rotor and the moment load. The moment of load is an external disturbing influence, effective methods of its measurement are not available. Therefore, the purpose of this paper is to mathematically describe the observer of the state variables of the active power channel and the load moment on the shaft of an asynchronous electric drive with vector control.

Methodology. To achieve the purpose of the work, the method of synthesis modal observers is applied using the field-oriented model of the asynchronous machine with the decomposition of its equations and taking into account the nonlinearities of cross-connections between the control channels.

Results. As part of the relay-vector control system, a modal observer of the load moment is synthesized, the information from the output of which can be used to build algorithms for extreme control of an asynchronous electric drive. The asymptotic stability is proved by the method of mathematical modeling and is sufficient the accuracy of the observer of the load moment at different distributions of the roots its characteristic equation.

Scientific novelty. The paper solves the actual scientific problem of establishing the regularities of the structural-algorithmic synthesis and tuning of the modal observer of the moment of load on the shaft of an asynchronous electric drive. Identification of the moment load on the shaft of an electric machine will allow to improve the quality indicators of extreme control systems of asynchronous electric drives.

Practical significance. The obtained equations of the observer determine the load moment identification algorithm, the information about which can be used in two-channel vector control systems for asynchronous electric drives to build an external extreme control circuit, which improves the energy performance of the asynchronous machine. First of all, we are talking about minimizing the loss of active power or the consumption of reactive power an asynchronous machine when the load moment on its shaft changes.

Keywords: *asynchronous machine, vector control, modal observer of load moment, asymptotic stability, distribution of polynomial roots.*