

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СПОСТЕРІГАЧІВ СТАНУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ У БЕЗДАТЧИКОВИХ ВЕКТОРНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Болтенко О. О., Івченков М. В., Шеремет О. І.

Существует много различных решений для построения асинхронных бездатчиковых электроприводов. Как правило, под бездатчиковым электроприводом понимают электропривод, не содержащий датчика скорости. Датчики же электрических величин (напряжения или тока) в подобных системах присутствуют. Бездатчиковые системы управления требуют применения алгоритмов оценки скорости. Обеспечение высоких показателей качества в динамике осуществляется с помощью векторного управления, в котором взаимное расположение векторов потокосцепления и токов определяет динамические свойства автоматизированной электромеханической системы. Значения величин векторов потокосцеплений чаще всего рассчитываются с помощью математической модели статора и ротора асинхронного двигателя. В электроприводах с бездатчиковым векторным управлением для оценки угловой скорости применяют различные математические модели асинхронного двигателя. Параметры подобных моделей не всегда адекватно воспроизводят параметрами двигателя, они могут значительно изменяться при вариации температурных режимов или других условий работы. Поэтому бездатчиковые системы векторного управления, кроме моделей для определения скорости, должны иметь средства идентификации параметров двигателя. В статье выполняется аналитический обзор наблюдателей состояния, используемых в бездатчиковых векторных системах управления электроприводами, который показал, что их можно разделить на две группы: измеряющие и работающие на базе некоторых математических моделей. Измеряющие наблюдатели осуществляют измерения некоторых величин, а другие – получают путем расчета. Наблюдатели, работающие на основе математических моделей, зависят от их точности и математического аппарата, применяемого для расчета неизвестных параметров. Задача выбора того или иного наблюдателя состояния для бездатчиковой векторной системы управления зависит от специфики автоматизированной электромеханической системы и технологического процесса, в котором она задействована.

Ключевые слова: бездатчиковое векторное управление, наблюдатель, асинхронный двигатель, электромеханическая система.

Існує багато різноманітних рішень для побудови асинхронних бездатчикових електроприводів. Як правило, під бездатчиковим електроприводом розуміють електропривод, що не містить датчика швидкості. Датчики ж електричних величин (напруги або струму) у подібних системах присутні. Бездатчикові системи керування потребують застосування алгоритмів оцінки швидкості. Забезпечення високих показників якості у динаміці здійснюється за допомогою векторного керування, в якому взаємне розташування векторів потокосцеплення і струмів визначає динамічні властивості автоматизованої електромеханічної системи. Значення величин векторів потокосцеплень частіше за все розраховуються за допомогою математичної моделі статора і ротора асинхронного двигуна. В електроприводах з бездатчиковим векторним керуванням для оцінки кутової швидкості застосовують різноманітні математичні моделі асинхронного двигуна. Параметри подібних моделей не завжди адекватно відтворюють параметрами двигуна, вони можуть значно змінюватися при варіації температурних режимів або інших умов роботи. Тому бездатчикові системи векторного керування, окрім

моделей для визначення швидкості, повинні мати засоби ідентифікації параметрів двигуна. В статті виконується аналітичний огляд спостерігачів стану, що використовуються у бездатчикових векторних системах керування електроприводами, який показав, що їх можна розділити на дві групи: вимірюючі та такі, що працюють на базі деяких математичних моделей. Вимірюючі спостерігачі здійснюють вимірювання деяких величин, а інші – отримують шляхом розрахунку. Спостерігачі, що працюють на основі математичних моделей, залежать від їх точності та математичного апарату, який застосовується для розрахунку невідомих параметрів. Задача вибору того чи іншого спостерігача стану для бездатчикової векторної системи керування залежить від специфіки автоматизованої електромеханічної системи та технологічного процесу, в якому вона задіяна.

Ключові слова: бездатчикове векторне керування, спостерігач, асинхронний двигун, електромеханічна система.

There are many different solutions for constructing asynchronous sensorless drives. As a rule, sensorless electric drive is understood as an electric motor that does not contain a speed sensor. Sensors of the same electrical values (voltage or current) in such systems are present. Identical control systems require the use of speed estimation algorithms. The provision of high quality indicators in dynamics is carried out with the help of vector control, in which the mutual location of the vectors of the flow coupling and currents determines the dynamic properties of the automated electromechanical system. The values of the vectors of the flow couplings are most often calculated using the mathematical model of the stator and the rotor of the asynchronous motor. Various mathematical models of the asynchronous motor are used in an electromotive drive with sensorless vector control to estimate angular velocity. Parameters of such models do not always adequately reproduce the parameters of the engine; they can vary considerably when temperature regimes or other operating conditions change. Therefore, the sensorless vector control systems, in addition to the models for determining the speed, should have means for identifying the engine parameters. The article analyzes the state observers used in sensorless vector control systems for electric drives, which showed that they can be divided into two groups: measuring and working on the basis of some mathematical models. Measurement observers carry out measurements of some quantities, while others are obtained by calculation. Observers working on the basis of mathematical models depend on their accuracy and mathematical apparatus, which is used to calculate unknown parameters. The task of selecting an observer for a sensorless vector control system depends on the specifics of the automated electromechanical system and the process in which it is involved.

Keywords: sensorless vector control, observer, asynchronous motor, electromechanical system.

Шеремет А. И.

д-р техн. наук, зав. каф. ЭСА ДГМА
sheremet-a@mail.ru

Ивченков Н. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА

Болтенко А. А.

магистр кафедры ЭСА ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 62-523

Болтенко О. О., Івченков М. В., Шеремет О. І.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СПОСТЕРІГАЧІВ СТАНУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ У БЕЗДАТЧИКОВИХ ВЕКТОРНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Асинхронний двигун як об'єкт частотного керування може описуватися різними способами, в залежності від прийнятої системи координат, в статичному або динамічному режимах. Аналіз статичних режимів доцільно проводити в комплексній формі для просторових векторів, нерухомих один відносно іншого при їх обертанні зі швидкістю, яка залежить від частоти напруги живлення або струму. Аналіз динамічних режимів природно здійснювати у формі миттєвих значень змінних, які в цьому випадку є рішеннями відповідних диференціальних рівнянь [1].

При здійсненні математичного опису асинхронного двигуна зазвичай використовують загальноприйняті допущення, а саме: трифазна асинхронна електрична машина є симетричною і ненасиченою, вплив пазів і втрати в сталі статора відсутні, магнітне поле обмоток синусоїдне, повітряний зазор рівномірний [2].

Асинхронний електропривод іноді виступає в якості об'єкта для ідентифікації невідомих параметрів. Може бути необхідною як оцінка параметрів двигуна (наприклад, індуктивних або активних опорів), так і оцінка координат (струму, швидкості, моменту, потокозчеплення). В електроприводах, які передбачають регулювання швидкості, основне призначення систем ідентифікації полягає у визначенні швидкості обертання двигуна при відсутності датчиків на його валу без суттєвого погіршення динамічних властивостей системи керування [3, 4]. Переваги асинхронного бездатчикового електроприводу полягають в наступному [5]:

- зменшення складності конструкції електроприводу при зниженні його вартості;
- зниження масогабаритних показників;
- спрощення збільшення надійності системи за рахунок відсутності окремих компонентів – датчиків;
- можливість роботи в несприятливих умовах.

Проте, бездатчикові електроприводи потребують застосування систем ідентифікації невідомих параметрів, які потрібні для здійснення керування.

Метою роботи є аналітичний огляд спостерігачів стану, що використовуються у бездатчикових векторних системах керування електроприводами.

Існує багато різноманітних рішень для побудови асинхронних бездатчикових електроприводів. Багато з них з'явилися в останнє десятиліття. Як правило, під бездатчиковим електроприводом розуміють електропривод, що не містить датчика швидкості. Датчики ж електричних величин (напруги або струму) у подібних системах присутні. Бездатчикові системи керування потребують застосування алгоритмів оцінки швидкості. Наприклад, оцінка швидкості отримала досить широке поширення при здійсненні скалярного керування, проте такі системи не можуть забезпечити високі показники якості керування в динамічних режимах роботи [6].

Забезпечення високих показників якості у динаміці здійснюється за допомогою векторного керування, в якому взаємне розташування векторів потокозчеплення і струмів визначає динамічні властивості автоматизованої електромеханічної системи. Значення величин векторів потокозчеплень частіше за все розраховуються за допомогою математичної моделі статора і ротора асинхронного двигуна [7].

В електроприводах з бездатчиковим векторним керуванням для оцінки кутової швидкості застосовують різноманітні математичні моделі асинхронного двигуна. Параметри подібних моделей не завжди адекватно відтворюють параметрами двигуна, вони можуть значно змінюватися при варіації температурних режимів або інших умов роботи. Тому бездатчикові системи векторного керування, окрім моделей для визначення швидкості, повинні мати засоби ідентифікації параметрів двигуна [8].

Як правило, моделі або структури, що можуть здійснювати оцінку невідомих параметрів двигуна або електропривода за відомими величинами, називають спостерігачами. З практичної точки зору спостерігачі стану можна класифікувати таким чином, як це представлено на рис. 1.

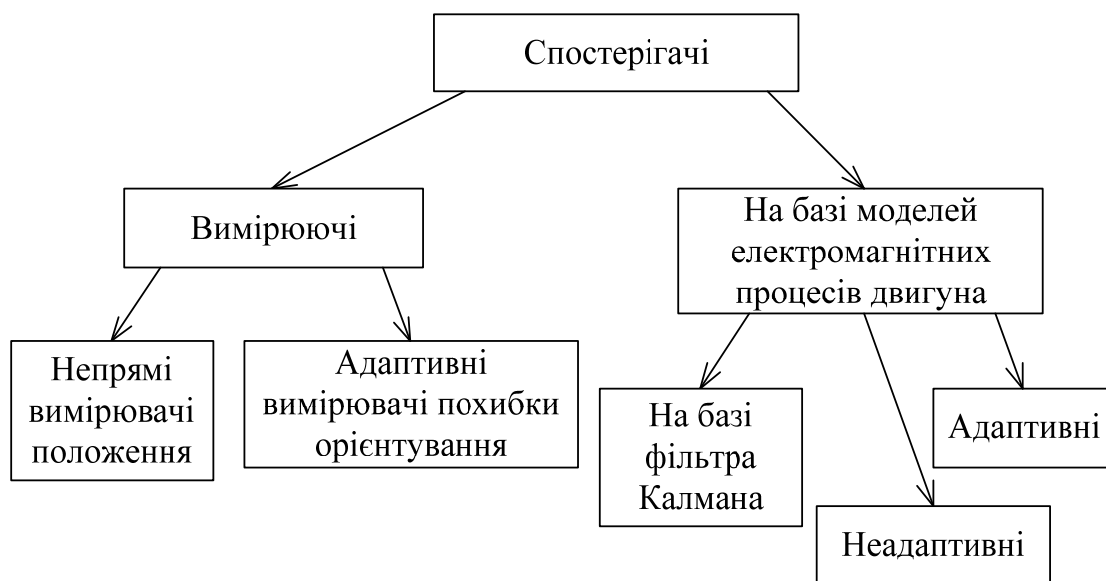


Рис. 1. Спрощена класифікація спостерігачів стану

Непрямі вимірювачі положення застосовуються в бездатчикових приводах і використовують магнітну неоднорідність властивостей двигуна. Наприклад, несиметричність обмоток або неоднорідність магнітної проникності. Останнім часом вельми популярні вимірюючі спостерігачі, які використовують метод високочастотної інжекції. Метод зводиться до генерації силовим інвертором високочастотного тестового сигналу і пошуку по реакції на цей сигнал реального положення ротора. Швидкість ротора при такому підході оцінюється як диференціал положення. Недоліком непрямих вимірювачів положення є їх складність та підвищення рівня шуму у корисному сигналі [9].

Вимірювачі похибки орієнтування застосовуються в бездатчикових приводах. Вони визначають положення обертової системи координат, використовуючи внутрішні сигнали системи керування, які залежать від похибки її орієнтування. Їх можна назвати адаптивними, оскільки вони зводять помилку орієнтування до нуля.

Неадаптивні спостерігачі, побудовані на основі моделей двигуна, застосовуються в асинхронних приводах з датчиками швидкості і положення. Приклад неадаптивного обчислювача потокозчеплення наведено на рис. 2.

На вхід такого обчислювача надходить інформація про значення кута повороту ротора θ_R та струму статора в проекціях на координатні осі d та q – I_{sd} , I_{sq} . На виходах обчислювача формується значення модуля вектора потокозчеплення ротора $|\hat{\psi}_R|$ та його кутового положення $\hat{\theta}_{\psi R}$. Чисельні значення параметрів (L_m , T_R , Z_p та інші), що входять до складу обчислювача, визначаються виходячи з математичної моделі двигуна.

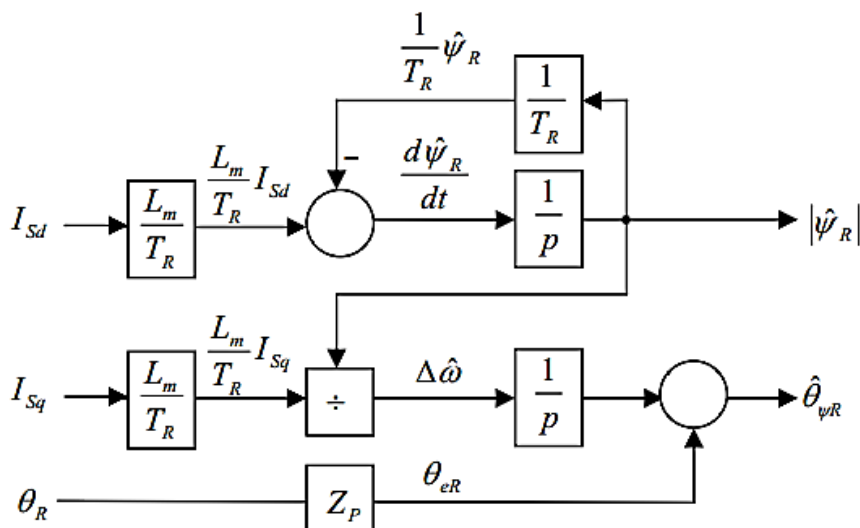


Рис. 2. Приклад неадаптивного обчислювача потокозчеплення

Адаптивні спостерігачі на основі моделі двигуна можуть застосовуватися як в датчиковому, так і в бездатчиковому електроприводах. В їх основу також закладені моделі електромагнітних процесів двигуна. Ці спостерігачі будуються як стежні системи і окрім моделі містять ще регулятор, що адаптує модель до реальних процесів, які відбуваються в двигуні або приводі. У зарубіжній літературі вони називаються MRAS-спостерігачами (Motor Reference Adaptive System), тобто спостерігачами з еталонною моделлю. Наприклад, потокозчеплення ротора можна визначити як за допомогою моделі статора, так і за допомогою моделі ротора [10]. У моделі статора для цього потрібно знати струм і напругу статора, а в моделі ротора – струм статора і швидкість ротора. При однаковому струмі статора, потік, оцінений за цими двома моделями, буде збігатися, якщо швидкість на вході моделі ротора дорівнюватиме реальній швидкості ротора. На цьому припущенні заснована ідея побудови адаптивного спостерігача станів, що дозволяє обчислити значення потокозчеплення і швидкості ротора (рис. 3).

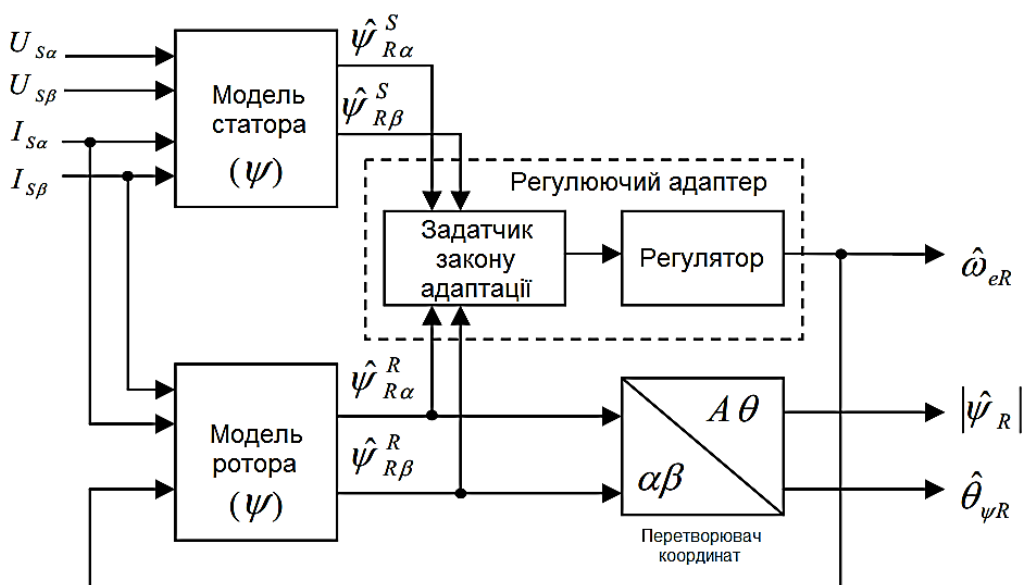


Рис. 3. Структура адаптивного спостерігача стану

Умовно вважається, що модель статора є еталонною, тобто обчислене в ній потокозчеплення є точним і збігається з реальним потокозчепленням двигуна. Модель ротора при такому підході адаптується за потоком під модель статора. Адаптація моделі ротора

здійснюється регулюючим адаптером. Він порівнює потоки моделей і виробляє за допомогою регулятора сигнал оцінки швидкості $\hat{\omega}_{er}$, який і є адаптувальним. Функцію перетворення порівнюваних векторних величин (в даному випадку – поточкозчеплень) в скалярний сигнал оцінки швидкості на виході регулятора називають законом адаптації [11].

Для зручності подальшого використання обчислене в моделі ротора значення поточкозчеплення ротора можна перетворити з декартової нерухомої системи координат в полярну. Це перетворення здійснюється за допомогою наступних формул [12]:

$$|\hat{\psi}_R| = \sqrt{(\hat{\psi}_{R\alpha})^2 + (\hat{\psi}_{R\beta})^2}, \quad \hat{\theta}_{\psi R} = \arctg \frac{\hat{\psi}_{R\beta}}{\hat{\psi}_{R\alpha}}.$$

Спостерігачі на основі фільтра Калмана застосовуються в бездатчикових приводах. Цей спостерігач являє собою певний цифровий фільтр, алгоритм функціонування якого будується з урахуванням законів математичної статистики. Він дозволяє відновлювати невідомий параметр, мінімізуючи при цьому вплив перешкод вимірювання. Спостерігачі на основі фільтра Калмана дозволяють отримувати достатньо високу точність спостереження.

Фільтр Калмана є адаптивним спостерігачем, структура якого зображена на рис. 4 (\mathbf{x} – невідомий або частково відомий вектор стану об'єкта; \mathbf{r} – вектор випадкових впливів на об'єкт; \mathbf{u} – невідомий вектор вхідної дії; \mathbf{r} – вектор випадкових впливів на об'єкт; \mathbf{A} , \mathbf{B} – матриці, що містять параметри об'єкта; \mathbf{y} – вектор вимірюваних вихідних величин, що має меншу розмірність ніж вектор \mathbf{x} ; \mathbf{C} – деяка задана матриця вимірювання; \mathbf{p} – випадковий вектор шуму вимірювань).

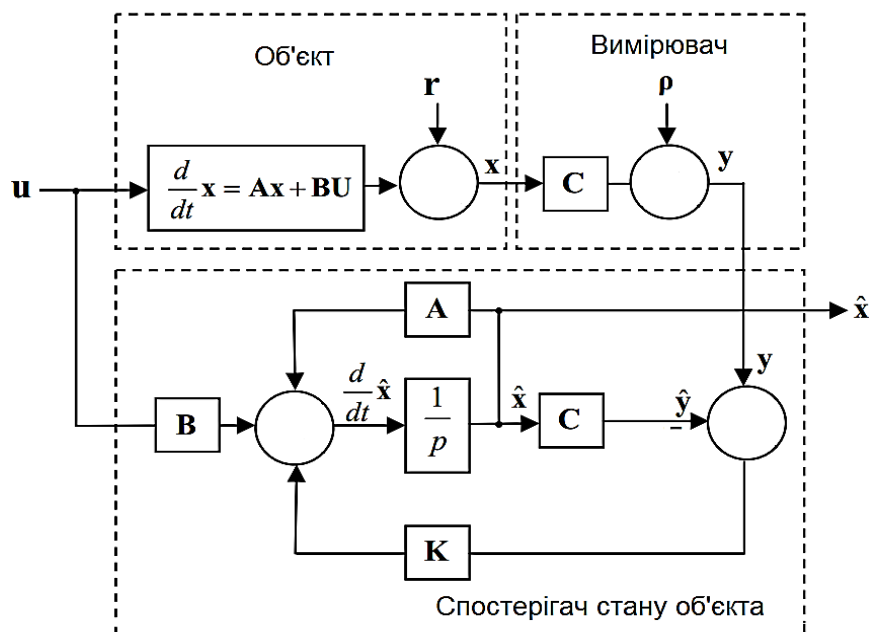


Рис. 4. Адаптивний спостерігач на базі фільтра Калмана

В основу спостерігача покладена модель, рівняння якої збігаються з рівняннями, що описують об'єкт:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u}; \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}, \end{cases}$$

де $\hat{\mathbf{x}}$ – оцінка невідомого вектора стану об'єкта.

Адаптація параметрів моделі до реальності здійснюється за допомогою різниці вимірюваного вектора \mathbf{y} і його оцінки ($\hat{\mathbf{y}}$). Передбачається, що якщо ця різниця нульова, то і оцінка вектора станів $\hat{\mathbf{x}}$ дорівнює його істинному значенню (\mathbf{x}).

Рівняння спостерігача виглядає наступним чином:

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}).$$

Ключове питання полягає в тому, як в умовах випадкових перешкод і впливів на об'єкт (\mathbf{r} і \mathbf{p}), знайти матрицю адаптації \mathbf{K} . Математичний апарат, розроблений Калманом, дозволяє це зробити.

ВИСНОВКИ

Виконаний аналітичний огляд спостерігачів стану, що використовуються у бездатчикових векторних системах керування електроприводами, показав, що їх можна розділити на дві групи: вимірюючі та такі, що працюють на базі деяких математичних моделей. Вимірюючі спостерігачі здійснюють вимірювання деяких величин, а інші – отримують шляхом розрахунку. Спостерігачі, що працюють на основі математичних моделей, залежать від їх точності та математичного апарату, який застосовується для розрахунку невідомих параметрів. Загалом, задача вибору того чи іншого спостерігача стану для бездатчикової векторної системи керування залежить від специфіки автоматизованої електромеханічної системи та технологічного процесу, в якому вона задіяна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Holtz J. *Sensorless Control of Induction Motor Drives* / J. Holtz // *Proceedings of the IEEE*. – Aug. 2002. – Vol. 90. – № 8. – P. 1359–1394.
2. Булгаков А. А. *Частотное управление асинхронными двигателями* / А. А. Булгаков. – М. : Энергоиздат, 1982. – 216 с.
3. Виноградов А. *Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов* / А. Виноградов, А. Сибирицев, С. Журавлев // *Силовая электроника*. – 2007. – № 1. – С. 46–52.
4. Holtz J. *The Representation of AC Machine Dynamics by Complex Signal Flow Graphs* // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – June 1995. – Vol. 42 – № 3 – P. 263–271.
5. Котин Д. А. *Вопросы построения алгоритмов бездатчикового векторного управления асинхронным электроприводом* / Д. А. Котин // *Наука. Технологии. Инновации-2005 : Матер, всерос. науч. конф. молодых ученых. В 7 частях*. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – Ч. 3. – С. 179–181.
6. Blaschke F. *The Principle of Field Orientation as applied to the New Transvector Closed Loop Control System in a PWM Inverter Induction Motor Drive* / F. Blaschke // *Siemens Review*. – 1972. – Vol. 39. – № 5. – P. 217–220.
7. Schauder C. *Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers* / C. Schauder // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego*. – 1989. – P. 493–499.
8. Peng F. Z. *Robust Speed Identification for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors* / F. Z. Peng, T. Fukao, J. S. Lai // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – Sept.-Oct. 1994. – Vol. 30 – № 5. – P. 1234–1240.
9. *A High Performance Speed Control Scheme for Induction Motor without Speed and Voltage Sensors* / T. Okuyama, N. Fujimoto, T. Matsui, Y. Kubota // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver*. – 1986. – P. 106–111.
10. Панкратов В. В. *Векторное управление асинхронными электроприводами : учеб. пособ.* / В. В. Панкратов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1999. – 66 с.
11. Ohtani T. *Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder* / T. Ohtani, N. Takada, K. Tanaka // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – Jan.-Feb. 1992. – Vol. 28. – № 1. – P. 157–165.
12. *Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями* / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.