

М. Я. Островерхов<sup>1</sup>  
М. П. Бурик<sup>1</sup>

## ОПТИМАЛЬНА ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ЕНЕРГІЇ ПРИСКОРЕННЯ СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

*Запропоновано метод оптимізації алгоритму керування положенням векторно-керованого асинхронного електропривода на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що дозволило отримати високу динамічну точність відпрацювання заданої траєкторії під час дії параметричних збурень у вигляді збільшення електричного опору обмотки ротора та сумарного моменту інерції.*

**Ключові слова:** оптимізація, критерій мінімуму енергії прискорення, асинхронний електропривод, система регулювання положення.

### Вступ

Асинхронні електроприводи є найпоширенішими в електромеханічних системах механізмів і установок. Головна перевага асинхронного двигуна (АД) полягає у високій надійності та низькій вартості. Проте математична модель АД є взаємозв'язаною й нелінійною системою [1], що ускладнює реалізацію якісних систем керування координатами електроприводів.

Сучасний асинхронний електропривод повинен забезпечувати високу динамічну точність відпрацювання заданих траєкторій під час дії параметричних збурень, спричинених насиченням магнітного кола двигуна, нагріванням обмоток, ефектом витіснення струму при зміні частоти основної гармоніки напруги живлення, зміною сумарного моменту інерції електропривода у разі зміни кінематики механізму в ході роботи. Тому система керування положенням повинна забезпечувати грубість до дії координатних і параметричних збурень.

Вказані проблеми векторно-керованого асинхронного електропривода можна вирішити за допомогою застосування алгоритмів керування на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій. Ідея запропонованого методу регулювання полягає в знаходженні керуючої функції, за якої замкнута система має наперед задану функцію Ляпунова та має асимптотичну стійкість. Характерною особливістю методу є відсутність вирішення нелінійних матричних рівнянь Ріккати чи Ляпунова або рівнянь в часткових похідних, як в традиційних системах [2, 3]. Алгоритми керування об'єктом записуються згідно з нелінійними моделями, що відображають його динаміку. Простота практичної реалізації представлених алгоритмів керування зумовлена відсутністю диференціальних ланок. Динамічні процеси в замкнутих контурах наближаються до бажаних зі збереженням стійкості системи за підвищення коефіцієнтів підсилення регуляторів.

*Метою роботи є оптимізація законів керування системи векторного регулювання положення асинхронного електропривода за критерієм мінімуму енергії прискорення, що забезпечує високу якість регулювання під час дії параметричних та координатних збурень.*

### Результати дослідження

Математична еквівалентна двофазна модель АД в синхронній системі координат за стандартних припущень (відсутні втрати в сталі статора та ротора, симетричні зсуви осей обмоток статора та ротора на  $120^\circ$ , відсутнє насичення магнітного кола, синусоїдально розподілені сили намагнічування обмоток двигуна вздовж кола повітряного проміжку), описується такою системою диференціальних рівнянь [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (|\psi_2| i_{1q}) - T_l \right] = \frac{T}{J} - \frac{T_l}{J}; \\ \frac{di_{1d}}{dt} + \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m \right) i_{1d} &= \alpha \beta |\psi_2| + \omega_0 i_{1q} + \frac{u_{1d}}{\sigma} = V_{1d} + \frac{u_{1d}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} + \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m \right) i_{1q} &= -\beta \omega p_n |\psi_2| - \omega_0 i_{1d} + \frac{u_{1q}}{\sigma} = V_{1q} + \frac{u_{1q}}{\sigma}; \\ \frac{d|\psi_2|}{dt} + \alpha |\psi_2| &= \alpha L_m i_{1d}; \\ \frac{d\varepsilon_0}{dt} &= \omega_0 = \omega p_n + \frac{\alpha L_m i_{1q}}{|\psi_2|}, \quad \varepsilon_0(0) = 0, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де  $\omega$ ,  $\omega_0$  — кутова швидкість ротора та магнітного поля;  $\theta$  — кут положення ротора;  $L_1, L_2, L_m$  — індуктивність обмотки статора, ротора та контуру намагнічування;  $\alpha = R_2/L_2$ ;  $\sigma = L_1 - L_m^2/L_2$ ;  $\beta = L_m/\sigma L_2$  — коефіцієнти математичної моделі;  $R_1, R_2$  — активний опір обмотки статора та ротора;  $U_{1d}, U_{1q}$  — компоненти вектора напруги статора;  $i_{1d}, i_{1q}$  — компоненти вектора струму статора;  $|\psi_2|$  — модуль вектора потокозчеплення ротора;  $J$  — сумарний момент інерції електропривода;  $p_n = 1$  — число пар полюсів;  $T_l$  — момент навантаження;  $\varepsilon_0$  — кутове положення рухомої системи координат ( $d-q$ ) відносно нерухомої системи координат ( $a-b$ );  $V_{1d}, V_{1q}$  — координатні збурення внаслідок взаємного впливу.

Координатні збурення трактуються як невизначені, проте обмежені за величиною  $V_{1d} \leq V_{1d}^0$ ,  $V_{1q} \leq V_{1q}^0$ . Рівня керуючих впливів достатньо для їх компенсації.

Функціональна схема системи прямого векторного керування кутовим положенням асинхронного електропривода показана на рис. 1. Вона містить: датчик кутової швидкості BR (encoder); датчики струмів трьох фаз А, В, С; асинхронний двигун АД; перетворювачі фаз ПФ1, ПФ2 та координат ПК1, ПК2: спостерігач модуля потокозчеплення ротору СП; регулятори компонент струму статора в ( $d-q$ ) системі координат РС1, РС2; вектор-фільтр ВФ (для визначення кутового положення  $\varepsilon_0$ ); регулятор модуля потокозчеплення ротора РП1; регулятор положення ротора РП2. Всі фазні та координатні перетворення виконуються за відомими формулами. Спостерігач потокозчеплення СП є традиційним та має перший порядок.

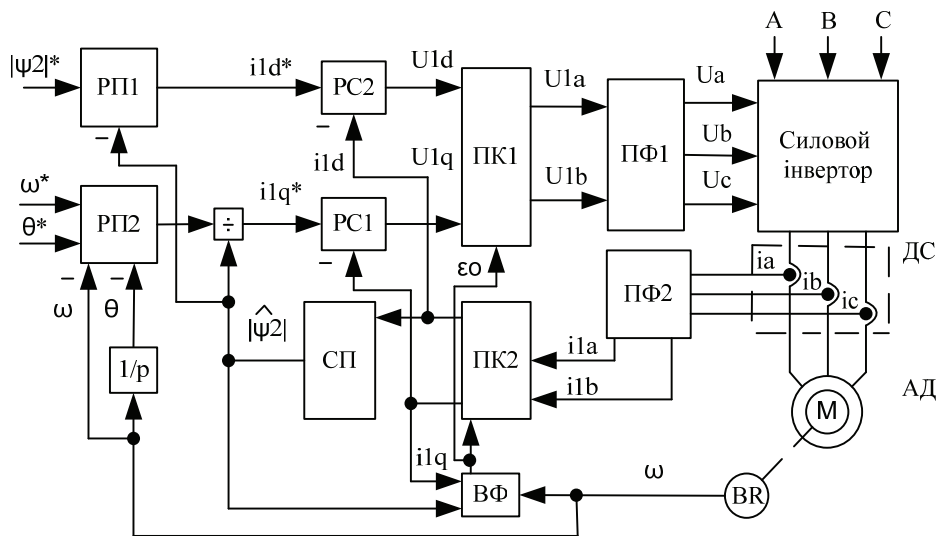


Рис. 1. Функціональна схема системи прямого векторного керування кутовим положенням асинхронного електропривода

Раніше авторами роботи було розроблено алгоритми керування польовою та моментною компонентами вектора струму статора регуляторів PC1, PC2 та модулем вектора потокозчеплення ротора регулятора РП1 на основі концепції зворотних задач динаміки за мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій [4]. Алгоритм керування регулятора PC2 компоненти вектора струму статора  $i_{1d}$  забезпечує астатизм першого порядку за керувальною дією

$$u_{1d} = k_{i1d} (z - i_{1d}); \quad z = \gamma_{0i1d} \int (i_{1d}^* - i_{1d}) dt, \quad (2)$$

де  $k_{i1d}$  — коефіцієнт підсилення регулятора;  $z$  — проміжна координата;  $\gamma_{0i1d}$  — коефіцієнт, яким задається тривалість перехідного процесу без перерегулювання;  $i_{1d}^*$  — задане значення компоненти вектора струму.

Оцінка впливу неврахованої інерційності силового перетворювача частоти зі сталою часу  $T_\mu$  на динамічні властивості замкнутого контуру компоненти струму статора  $i_{1d}$  вимагає для збереження стійкості виконання умови  $\gamma_{0i1d} < (1/T_\mu) + (R_1/\sigma) + \alpha\beta L_m$  [4]. Для забезпечення допустимої динамічної похибки струму повинні бути співвимірними задана та реальна добротність  $D_\omega^z = D_\omega$ , що виконується, якщо коефіцієнт підсилення регулятора струму  $k_{i1d} \geq 100$ .

Алгоритми керування компонентою вектора струму статора  $i_{1q}$  та модулем вектора потокозчеплення ротора мають аналогічну до (2) структуру. При цьому параметри регулятора PC1 компоненти вектора струму статора  $i_{1q}$  дорівнюють параметрам регулятора PC2, тобто  $\gamma_{0i1q} = \gamma_{0i1d} = 1000$ ;  $k_{i1q} = k_{i1d}$ . Контур регулювання модуля вектора потокозчеплення ротора є зовнішнім відносно до внутрішнього контуру польової складової струму статора  $i_{1d}$ . Для зменшення впливу динаміки внутрішнього контуру на зовнішній контур необхідно задавати параметр регулятора РП1 за умови  $\gamma_{0\psi} \leq \gamma_{0i1d} / (3 \dots 10)$ .

Основою науковою задачею цієї роботи є оптимізація контуру керування положенням електропривода, який є зовнішнім відносно оптимізованого контуру компоненти струму статора  $i_{1q}$ . Для коректної роботи цих контурів процеси в них також необхідно розділити в часі шляхом встановлення відповідного відношення власних частот недемпфованих коливань.

Диференціальне рівняння, за допомогою якого задається бажаний вигляд перехідних процесів за положенням та астатизм другого порядку за керуючою дією, має другий порядок

$$\ddot{z} + \gamma_1 \dot{z} + \gamma_0 z = \gamma_0 \theta^* + \gamma_1 \dot{\theta}^* + \gamma_2 \ddot{\theta}^*, \quad (3)$$

де  $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$  — коефіцієнти, що визначають характер та тривалість бажаного перехідного процесу;  $\theta^*$  — координата керуючої функції (кут положення ротора АД).

Ступінь наближення реального процесу керування положенням до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує енергію прискорення, нормовану за моментом інерції [2]

$$G(i_{1q}^*) = \frac{1}{2} [\dot{z} - \ddot{\theta}(i_{1q}^*)]^2. \quad (4)$$

В результаті мінімізації за градієнтною схемою першого порядку алгоритм керування положенням ротора набуває такого вигляду:

$$i_{1q}^* = k_\theta (\dot{z} - \dot{\theta}); \quad \dot{z} = \gamma_0 \int (\theta^* - \theta) dt + \gamma_1 (\theta^* - \theta) + \gamma_2 \ddot{\theta}^*, \quad (5)$$

де  $k_\theta$  — коефіцієнт підсилення регулятора положення.

Добротність за прискоренням контуру кутового положення асинхронного електропривода визначається з передаточної функції розімкнутого контуру

$$D_\varepsilon = D_\varepsilon^z = \gamma_0 / (1 - \gamma_2) \quad (6)$$

та показує, що система володіє заданим астатизмом другого порядку за помірною коефіцієнта підсилення регулятора.

Значення параметрів регулятора положення РП2 можуть бути визначені на основі типової форми характеристичного полінома Бесселя, зокрема для  $\omega_0 = 40$  рад/с<sup>-1</sup> коефіцієнти рівняння дорівнюють  $\gamma_2 = (0 \dots 1)$ ,  $\gamma_1 = 120$ ,  $\gamma_0 = 4800$ . Коефіцієнт підсилення регулятора розраховується за формулою

$$k_\theta = \frac{(3 \dots 5) \omega_z J L_2}{1,5 L_m |\Psi_2|}, \quad (7)$$

де  $\omega_z$  — частота зрізу розімкнутого контуру.

Дослідження представленої системи векторного керування положенням асинхронного електропривода проведено шляхом моделювання при дії двох параметричних збурень, а саме, збільшення на 140 % активного електричного опору обмотки ротора  $R_2$  та збільшення на 200 % сумарного моменту інерції  $J$ . Двигун має наступні дані:  $P_n = 3$  кВт,  $\omega_n = 300$  рад/с,  $U_{1n} = 380$  В,  $f_{1n} = 50$  Гц — номінальна потужність, кутова швидкість, лінійна напруга та частота напруги;  $R_1 = 2,577$  Ом,  $R_2 = 1,682$  Ом — активний опір статора та приведенного ротора;  $L_1 = 0,394$  Гн,  $L_2 = 0,399$  Гн — індуктивність статора та приведена ротора;  $L_m = 0,387$  Гн — індуктивність намагнічуючого контуру;  $J = 0,007$  кгм<sup>2</sup> — момент інерції двигуна;  $T_1 = 10$  Нм — момент навантаження. Суцільною лінією на рис. 2 зображені графіки координат при номінальних параметрах двигуна, а пунктирною лінією — при дії збурень. На рис. 2 наведені також траєкторії завдання кутового положення, модуля потокозчеплення, кутової швидкості ротора, середньоквадратичного значення активної потужності (цикл  $t = 3$  с) та профіль моменту навантаження.

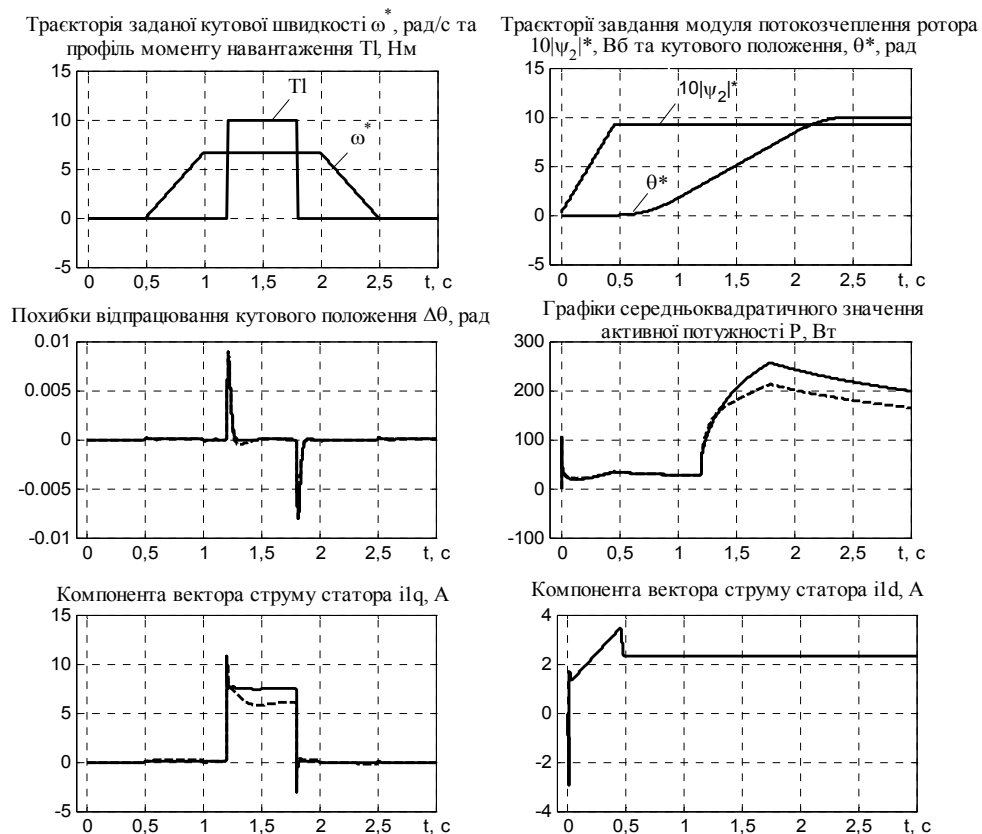


Рис. 2. Графіки заданих траєкторій та перехідних процесів координат системи прямого векторного керування

Як видно з рис. 2, запропоновані закони керування забезпечують максимальну похибку під час компенсування стрибка навантаження рівну 0,00826 рад при номінальних параметрах об'єкта керування та 0,00886 рад під час дії параметричних збурень (збільшення похибки на 7,26 %). При цьому не має деградації перехідних процесів електромеханічних координат системи. Вплив параметричних збурень зменшує значення моментної компоненти струму статора з 7,48 до 6,07 А при накиданні моменту навантаження, а також зменшує ефективне значення активної потужності з 198,9 до 164,8 Вт при відпрацюванні циклу за 3 с. Система відпрацьовує задану траєкторію кутового положення електропривода без динамічних похибок на ділянках усталеного руху.

### Висновки

Подана оптимальна за критерієм мінімуму енергії прискорення система векторного керування кутовим положенням асинхронного електропривода, яка забезпечує астатизм другого порядку за керуючою дією та високу якість регулювання під час перехідних процесів в умовах дії параметричних збурень у вигляді збільшення активного електричного опору обмотки ротора двигуна та сумарного моменту інерції електропривода, маючи при цьому задовільні енергетичні показники.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пересада С. М. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя: теория и экспериментальное тестирование / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, В. С. Бовкунович // Вісник НТУ «Львівська політехніка»: тематичний випуск науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». — Л.: НТУ «ЛПІ», 2009. — № 19. — С. 69—73.
2. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления: цикл лекций; учеб. пособие для вузов. / П. Д. Крутько. — М.: Машиностроение, 2004 — 576 с. — ISBN 5-217-03215-4.
3. Островерхов М. Я. Оптимізація електромеханічних систем на основі концепції зворотних задач динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій / М. Я. Островерхов, М. П. Бурик // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 2. — С. 143—147. — ISSN 1997-9266.
4. Островерхов М. Я. Керування електромеханічними системами на основі мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій / М. Я. Островерхов, М. П. Бурик // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. — 2013. — Вип. 1/2013(21). — С. 40—47. — ISSN 2074-9937.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.12.2015

**Островерхов Микола Якович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки, e-mail: [ostroverkhov@list.ru](mailto:ostroverkhov@list.ru);

**Бурик Микола Петрович** — канд. техн. наук, асистент кафедри теоретичної електротехніки.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

**M. Ya. Ostroverkhov<sup>1</sup>**  
**M. P. Buryk<sup>1</sup>**

## Vector Position Control System of Asynchronous Electric Drive that is Optimal by Minimum Energy Acceleration Criterion

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

*There has been presented the method of the optimization of control algorithms position vector of induction motor based on the concept of inverse problems of dynamics combined with the minimization of the local instantaneous energy values that allowed to obtain the high dynamic accuracy working off predetermined trajectory during the term of the temperature perturbation and change the total moment of inertia of the installation.*

**Keywords:** optimization, minimum energy acceleration criterion, asynchronous electric drive, position control system.

**Ostroverkhov Mykola Ya.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Theoretical Grounds of Electrical Engineering, e-mail: [ostroverkhov@list.ru](mailto:ostroverkhov@list.ru);

**Buryk Mykola P.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Theoretical Grounds of Electrical Engineering

**Н. Я. Островерхов<sup>1</sup>**  
**Н. П. Бурик<sup>1</sup>**

## Оптимальная по критерию минимума энергии ускорения система векторного регулирования положения асинхронного электропривода

<sup>1</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

*Предложен метод оптимизации алгоритма управления положением векторно-регулируемого асинхронного электропривода на основе концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий, что позволило получить высокую динамическую точность обработки заданной траектории во время действия параметрических возмущений в виде увеличения электрического сопротивления обмотки ротора и суммарного момента инерции.*

**Ключевые слова:** оптимизация, критерий минимума энергии ускорения, асинхронный электропривод, система регулирования положения.

**Островерхов Николай Яковлевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники, e-mail: [ostroverkhov@list.ru](mailto:ostroverkhov@list.ru);

**Бурик Николай Петрович** — канд. техн. наук, ассистент кафедры теоретической электротехники