

УДК 621.313

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕГУЛЯТОРІВ ЧАСТОТНО КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРИ СТОХАСТИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

Ю.В.Шуруб<sup>1</sup>, канд.техн.наук, А.О.Дудник<sup>2</sup>, канд.техн.наук, Д.С.Лавінський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

E-mail: [shurub@bigmir.net](mailto:shurub@bigmir.net),

<sup>2</sup> – Національний університет біоресурсів і природокористування України,  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

E-mail: [dudnikalla@mail.ua](mailto:dudnikalla@mail.ua)

*Сформовано критерії оптимізації законів регулювання асинхронними електроприводами з частотним керуванням при стохастичних навантаженнях. Показано можливість підвищення енергоефективності роботи таких електроприводів за рахунок застосування статистично оптимальних регуляторів. Запропоновано математичні моделі та визначено передатні функції контурів регулювання потокозчеплення асинхронних двигунів у режимі оптимізації енергоспоживання для векторного алгоритму керування, що реалізується перетворювачами частоти з властивостями джерела струму та джерела напруги. Розроблено рекомендації по застосуванню оптимальних регуляторів асинхронних електроприводів із стохастичними навантаженнями та частотним керуванням у залежності від спектральних характеристик навантаження. Бібл. 5, рис. 1.*

**Ключові слова:** асинхронний електропривод, випадкове навантаження, оптимальний регулятор.

**Вступ.** Широкий клас електроприводів, зокрема тих, які використовуються в механізмах сільськогосподарського та комунального призначення, мають випадковий характер зміни динамічних навантажень, що суттєво погіршує техніко-економічні показники роботи таких електроприводів. Підвищити їхню енергоефективність можна за рахунок створення замкнених систем із оптимальними регуляторами, які б враховували стохастичний характер збурень та виступали як фільтри випадкових високочастотних коливань навантаження. Структура таких регуляторів залежить від статистичних характеристик навантажень. У роботі розглядається синтез статистично оптимальних регуляторів системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» при постійній заданій частоті обертання для механізмів, які не вимагають регулювання швидкості.

**Метою даної роботи** є дослідження можливості застосування методики статистично оптимального синтезу регуляторів до асинхронних електроприводів з перетворювачами частоти при випадкових збуреннях.

**Матеріали досліджень.** У роботі [2] показано, що для забезпечення мінімальних втрат потужності в асинхронному двигуні при зміні статичного навантаження необхідно регулювати оптимальне потокозчеплення. У той самий час при динамічному навантаженні, що інтенсивно змінюється протягом технологічного циклу за випадковим законом, мінімальним втратам відповідатиме критерій мінімуму середньоквадратичної похибки регулювання оптимального параметру [1]. У випадку частотно регульованого електроприводу таким параметром є оптимальне потокозчеплення ротора. Найбільш ефективним способом його безпосереднього регулювання є векторне керування з орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора через розділення процесів керування потоком та моментом [4].

При даному способі керування фазними координатами є струми статора та потокозчеплення ротора. Модель АД у системі координат  $u-v$ , що обертається із синхронною швидкістю  $\omega_0$ , при виконанні умов орієнтації  $\Psi_{2u} = |\bar{\Psi}_2|$ ;  $\Psi_{2v} = 0$  має вигляд [5]

$$\frac{di_{1u}}{dt} = -\gamma i_{1u} + \omega_0 i_{1v} + \alpha \beta |\bar{\Psi}_2| + \frac{1}{\sigma} u_{1u}; \quad \frac{di_{1v}}{dt} = -\gamma i_{1v} - \omega_0 i_{1u} - \beta \omega |\bar{\Psi}_2| + \frac{1}{\sigma} u_{1v}; \quad (1,2)$$

$$\frac{d|\bar{\Psi}_2|}{dt} = -\alpha |\bar{\Psi}_2| + \alpha L_m i_{1u}; \quad J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} |\bar{\Psi}_2| i_{1v} - M_c; \quad (3,4)$$

де  $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$ ,  $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}$ ,  $\sigma = \frac{L_1 L_2 - L_m^2}{L_2}$ ,  $\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \frac{R_2 L_m^2}{\sigma L_2^2}$  – коефіцієнти, що визначаються параметрами АД,  $R_1$ ,  $R_2$  – активні опори статора та ротора,  $L_1$ ,  $L_2$  – індуктивності контурів статора та ротора,  $L_m$  – індуктивність контуру намагнічування,  $\omega_0$  – синхронна швидкість обертання системи координат,  $\omega$  – швидкість обертання ротора,  $i_{1u}$ ,  $i_{1v}$ ,  $u_{1u}$ ,  $u_{1v}$  – струми та напруги статора за осями  $u-v$ ,  $|\bar{\Psi}_2|$  – модуль потокозчеплення ротора,  $M_c$  – мо-

мент навантаження,  $J$  – момент інерції приводу.

У даній роботі рівняння (1) – (4) аналізуються за припущення, що відсутні параметричні збурення та існує технічна реалізація прямого або непрямого методів полеорієнтування.

Розглянемо два випадки, коли перетворювач частоти має властивості джерела струму та джерела напруги. При живленні від джерела струму рівняння (1) та (2) випадають з математичної моделі АД з векторним керуванням. Керуючими впливами у цьому випадку є струми статора  $i_{1u}$  та  $i_{1v}$ . Тоді регулювання потокозчеплення та моменту АД при векторному керуванні можуть відбуватися незалежно, причому згідно з рівняннями (3) та (4) зміна навантаження не впливатиме на зміну потокозчеплення.

При живленні від джерела напруги з'являється електромагнітний зв'язок між контурами регулювання моменту та потокозчеплення, що описується рівняннями (1) та (2). При припущенні про сталість оптимального значення потокозчеплення при сталій швидкості зміна активної складової струму статора згідно з (4) повністю визначається зміною моменту навантаження. Тоді згідно з рівняннями (1) та (3) зміна активної складової струму статора  $i_{1v}$  діятиме на контур регулювання потокозчеплення як збурення та може бути описана математично за допомогою статистичних характеристик випадкового процесу зміни навантаження.

Приймаючи вихідною величиною модуль потокозчеплення ротора (після відповідних перетворень рівнянь (1)–(3) та переходу до операторної форми запису), отримаємо передатні функції електропривода з векторним керуванням за сигналом керування – реактивною складовою напруги  $u_{1v}$ , та за сигналом збурення – активною складовою струму  $i_{1v}$ .

$$W_U(s) = \frac{|\tilde{\Psi}_2(s)|}{u_{1v}(s)} = \frac{K_U}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}, \quad W_M(s) = \frac{|\tilde{\Psi}_2(s)|}{i_{1v}(s)} = \frac{K_M}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}, \quad (5,6)$$

де  $K_U = 1/2\alpha\beta\sigma$  – передавальний коефіцієнт за сигналом завдання;  $K_M = \omega_0/2\alpha\beta$  – передавальний коефіцієнт за сигналом збурення;  $T_1 = \gamma/2L_m^2\alpha^3\beta^2$ ;  $T_2 = (\gamma + \alpha)/2L_m\alpha\beta$  – постійні часу,  $s$  – оператор Лапласа.

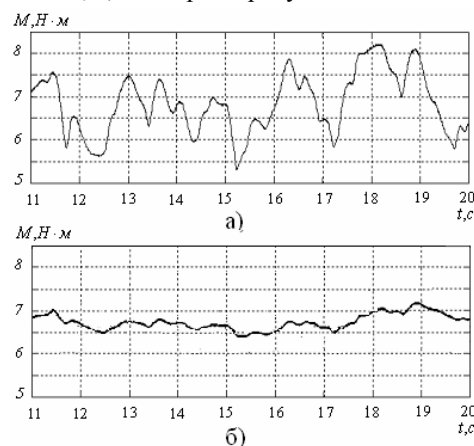
Отримання передатних функцій електропривода у режимі оптимального керування у вигляді (5)–(6) дозволяє застосувати до даних видів електроприводів методику синтезу статистично оптимальних регуляторів [3], яка полягає у визначенні характеристик регулятора, що забезпечують мінімум середньоквадратичної похибки регулювання параметру, що регулюється, у даному випадку – оптимального потокозчеплення ротора.

Згідно з даною методикою визначено, що при живленні від джерела струму передатна функція статистично оптимального регулятора не залежить від навантаження  $W_{reg}(s) = \frac{a_0 s + a_1}{b_0 s}$ , тоді як при живленні від дже-

рела напруги для навантаження з кореляційною функцією  $R(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|}$  передатною функцією такого регулятора є  $W_{reg}(s) = \frac{a_0 s + a_1}{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}$ , а для навантаження з кореляційною функцією  $R(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau$  маємо

$W_{reg}(s) = \frac{a_0 s + a_1}{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}$ . Коефіцієнти  $a_0, a_1, b_0, b_1, b_2$  визначаються параметрами передатних функцій електропри-

вода  $W_U(s)$  і  $W_M(s)$  та параметрами кореляційних функцій навантаження  $R(\tau)$  – дисперсії  $D$  та коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$ , що характеризують інтенсивність згасання та частоту коливань збурень.



На рисунку показано часові діаграми зміни електромагнітного моменту електроприводу прямої дробарки зерна із асинхронним двигуном типу 4А80В2, отримані у випадку нерегульованого приводу (а) та із застосуванням статистично оптимального регулятора (б) для однієї реалізації випадкового процесу навантаження з експоненціально-косинусною кореляційною функцією. Дані діаграми свідчать про фільтрацію оптимальним регулятором високочастотних складових механічних збурень, що дозволяє реалізувати енергоефективні закони керування, близькі до таких при статичному характері моменту навантаження.

Оцінити резерви енергоспоживання за рахунок застосування статистично оптимального регулятора можна за допомогою таких циклових показників, як циклові ККД та коефіцієнт потужності, що визначаються за період найменшої низькочастотної гармоніки реалізації збурення. Дослідження, проведені для даної реалізації процесу навантаження, показали збільшення ККД з 70 % у випадку нерегульованого приводу до 75 % – при застосуванні векторного керування з джерелом напруги та до 78 % – з джерелом струму. Відповідні зміни  $\cos \varphi$  : з 0,64

– при нерегульованому приводі до 0,84 – при живленні від джерела напруги та до 0,88 – при живленні від джерела струму.

**Висновки.** Отримані часові діаграми та енергетичні показники свідчать про доцільність застосування статистично оптимальних регуляторів для підвищення енергоефективності асинхронних електроприводів з частотним керуванням за рахунок фільтрації високочастотних складових випадкових навантажень. Визначено оптимальні структури регуляторів таких електроприводів у залежності від виду статистичних характеристик стохастичних збурень.

1. Пугачев В.С., Синицын И.Н. Стохастические дифференциальные системы. – Москва: Наука, 1985. – 559 с.
2. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – Москва: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Шуруб Ю.В. Методика синтезу статистично оптимальних систем асинхронних електроприводів // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 17–23.
4. Leonard W. Control of electric drives. – Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. – 460 p.
5. Peresada S., Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2000. – Vol. 14. – Pp. 177–200.

УДК 621.313

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТНО УПРАВЛЯЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Ю.В.Шуруб<sup>1</sup>, канд.техн.наук, А.А.Дудник<sup>2</sup>, канд.техн.наук, Д.С.Лавинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

E-mail: [shurub@bigmir.net](mailto:shurub@bigmir.net)

<sup>2</sup> – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,

ул. Героев Оборона, 15, Киев, 03041, Украина.

E-mail: [dudnikalla@mail.ua](mailto:dudnikalla@mail.ua)

*Сформированы критерии оптимизации законов регулирования асинхронными электроприводами с частотным управлением при стохастических нагрузках. Показана возможность повышения энергоэффективности работы таких электроприводов за счет применения статистически оптимальных регуляторов. Предложены математические модели и определены передаточные функции контуров регулирования потокосцепления асинхронных двигателей в режиме оптимизации энергопотребления для векторного алгоритма управления, которые реализуются преобразователями частоты со свойствами источника тока и источника напряжения. Разработаны рекомендации по применению оптимальных регуляторов асинхронных электроприводов со стохастическими нагрузками и частотным управлением в зависимости от спектральных характеристик нагрузки. Библ. 5, рис 1.*  
**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, случайная нагрузка, оптимальный регулятор.

### OPTIMIZATION OF REGULATORS OF FREQUENCY CONTROLLED INDUCTION ELECTRIC DRIVES UNDER THE STOCHASTIC LOADINGS

Yu.V. Shurub<sup>1</sup>, A.O. Dudnyk<sup>2</sup>, D.S. Lavinskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: [shurub@bigmir.net](mailto:shurub@bigmir.net)

<sup>2</sup> – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, 03041, Ukraine.

E-mail: [dudnikalla@mail.ua](mailto:dudnikalla@mail.ua)

*Optimization criteria of regulating laws for frequency controlled induction electric drives under the stochastic loads is formed. Possibility of energy efficiency increasing of electric drives due to using the statistically optimal regulators is showed. Mathematical models and transfer functions of regulating circuits of flux of induction motors in power optimization mode for vector control algorithm are proposed. They implemented by frequency converters with the properties of the current source and voltage source. Recommendations for using the optimal regulators of induction electric drives under the stochastic loadings and frequency control depending on the spectral characteristics of the loadings are developed. References 5, figure 1.*

**Key words:** induction electric drive, random loadings, optimal regulator.

1. Pugachev V.S., Sinitsin I.N. Stochastic differential systems. – Moskva: Nauka, 1985. – 559 p. (Rus)
2. Sandler A.S., Sarbatov R.S. Automatic frequency control of induction motors. – Moskva: Energiia, 1974. – 328 p. (Rus)
3. Shurub Yu.V. The technique of synthesis of statistically optimal systems of induction electric drives // Elektromekhanichni i Enerhozberihaiuchi Systemy. – 2013. – No 2/2013 (22). – Pp. 17–23. (Ukr)
4. Leonard W. Control of electric drives. – Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. – 460 p.
5. Peresada S., Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2000. – Vol. 14. – Pp. 177–200.

Надійшла 23.02.2016  
Остаточний варіант 25.04.2016