

**СТАТИСТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ЗА НАПРУГОЮ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**

**Ю.В.Шуруб**, канд.техн.наук  
**Інститут електродинаміки НАН України,**  
**пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**  
**E-mail: [shurub@bigmir.net](mailto:shurub@bigmir.net)**

*Показано можливість підвищення ефективності роботи асинхронних електроприводів, що мають стохастичні моменти навантаження, за рахунок створення замкнених систем із статистично оптимальними регуляторами. Визначено оптимальні структури регуляторів електроприводів такого класу в залежності від виду випадкових збурень. Моделювання роботи електроприводу дробарки зерна показало ефективність фільтрації статистично оптимальним регулятором високочастотних складових випадкових моментів навантаження, підвищення циклових показників енергоефективності електроприводу таких, як циклові ККД та коефіцієнт потужності, зменшення дисперсії його вихідних параметрів – електромагнітного моменту, швидкості, струму. Бібл. 4, рис. 1.*

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

Проблема оптимізації енергоспоживання в замкнених асинхронних електроприводах із перетворювачами напруги при статичному моменті навантаження є досить розробленою. В той же час недостатньо досліджені процеси в таких системах у динамічних режимах при змінному протягом технологічного циклу моменті навантаження, зокрема за випадковим законом. Такий характер зміни навантажень мають, наприклад, електроприводи робочих машин сільськогосподарського та комунального призначення таких, як дробарки, подрібнювачі кормів, гранулятори, змішувачі тощо.

В роботах [1, 2] показано, що для забезпечення мінімальних втрат потужності в асинхронному двигуні при зміні статичного навантаження необхідно підтримувати оптимальне ковзання, яке визначається за формулою

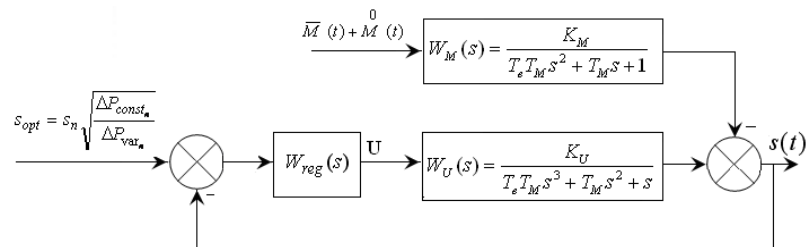
$$s_{opt} = s_n \sqrt{\Delta P_{const_n} / \Delta P_{var_n}}, \tag{1}$$

де  $\Delta P_{const_n}$  – номінальні сталі втрати в двигуні,  $\Delta P_{var_n}$  – номінальні змінні втрати в двигуні,  $s_n$  – номінальне ковзання двигуна.

Це можливо зробити за допомогою зворотного зв'язку за швидкістю. При виконанні закону (1) двигун в статичному режимі буде працювати на оптимальній механічній характеристиці з мінімальними втратами потужності. В динамічних режимах при різко змінному навантаженні внаслідок електромагнітної та електро-механічної інерції динамічні механічні характеристики будуть значно відхилятися від оптимальної характеристики, що не дозволяє досягти мінімальних втрат при застосуванні регулятора швидкості, спроектованого для умов статичного режиму, наприклад, для регулятора, який реалізує пропорційно-інтегральний закон керування (ПІ-регуляторі), що рекомендується для таких систем.

Тому метою даної роботи є розробка методики синтезу регулятора електроприводу за системою «перетворювач напруги – асинхронний двигун» при випадкових збуреннях, що застосовує методи статистично оптимального синтезу стохастичних динамічних систем [3], який полягає у визначенні характеристик регулятора, які забезпечують мінімум середньоквадратичної похибки регулювання параметру, що стабілізується, у даному випадку – оптимального ковзання.

Лінеаризовану структурну схему електропривода за системою «перетворювач напруги – асинхронний двигун» у режимі оптимізації енергоспоживання показано на рисунку, де  $s_{opt}$  – сигнал завдання (оптимальне ковзання);  $s(t)$  – вихідна регульована величина (миттєве значення дійсного ковзання);  $U$  – амплітуда першої гармоніки вихід-



ної напруги перетворювача (сигнал керування електроприводом);  $M(t) = \bar{M}(t) + M(t)$  – випадковий сигнал збурення, поданий у вигляді суми середнього значення  $\bar{M}(t)$  та центрованого випадкового процесу  $M(t)$ ;

$W_{reg}(s)$  – передаточна функція регулятора,  $W_U(s)$  – передавальна функція двигуна за сигналом керування,  $W_M(s)$  – передавальна функція двигуна за збуренням (моментом опору).

Особливістю запропонованої тут методики оптимізації є розкладання випадкового процесу навантаження на середнє значення  $\bar{M}(t)$ , що подається як корисний сигнал, та високочастотні флуктуації навколо середнього значення  $M(t)$ , що подаються як перешкоди – центрований стаціонарний випадковий процес. Зауважимо, що статичну складову частину збурення  $\bar{M}(t)$  в даному випадку вважаємо корисним сигналом тільки тому, що для нього вже є відомим закон оптимізації (1), і відповідний сигнал завдання  $S_{opt}$ , що є справжнім корисним сигналом за фізичним смислом, відпрацьовує саме цю складову. А вже для компенсації високочастотних флуктуацій збурення при оптимізації енергоспоживання електроприводу вважатимемо сигнал завдання таким, що дорівнює нулю ( $S_{opt} = 0$ ). При цьому сам регулятор можливо також розкласти на дві частини, одна з яких компенсує дію статичного моменту  $\bar{M}(t)$  (інтегруюча складова регулятора), а друга – дію високочастотних флуктуацій  $M(t)$  (статистично оптимальна складова регулятора  $W_{reg}(s)$ ).

Оптимізація енергоспоживання електроприводу при дії на нього тільки корисного сигналу  $\bar{M}(t)$  здійснюється як для статичного моменту за допомогою традиційних методик шляхом вибору сигналу завдання – оптимального значення ковзання  $S_{opt}$  за формулою (1) та введення інтегруючої складової регулятора  $1/s$  до прямого каналу електроприводу, що відображено в передавальній функції  $W_U(s)$ .

Методика статистично оптимального синтезу полягає у визначенні передавальної функції регулятора  $W_{reg}(s)$ , що забезпечує мінімум середньоквадратичної похибки системи  $\varepsilon_{rms}$ . Заданими є статистичні характеристики сигналу збурення – навантаження  $M(t)$ , наприклад, його спектральна густина  $S_M(\omega)$ , та передавальні функції об'єкту керування – асинхронного електроприводу.

Для центрованого стаціонарного випадкового процесу  $M(t)$  при нульовому математичному сподіванні середньоквадратична похибка дорівнюватиме кореню з дисперсії випадкової похибки системи

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{D_\varepsilon} \quad (2)$$

і може бути знайдена, виходячи із законів перетворення статистичних характеристик випадкового процесу динамічною системою з передавальною функцією  $W(s)$  замкненої системи асинхронного електроприводу за збуренням

$$W(s) = \frac{W_M(s)}{1 + W_{reg}(s) \cdot W_U(s)} \quad (3)$$

У відповідності до закону Хінчина-Вінера

$$D_\varepsilon = \int_0^\infty \left| \frac{W_M(j\omega)}{1 + W_{reg}(j\omega) \cdot W_U(j\omega)} \right|^2 S_M(\omega) d\omega, \quad (4)$$

де  $W_U(j\omega)$ ,  $W_M(j\omega)$  – частотні передавальні функції електродвигуна за керуванням та збуренням відповідно;  $W_{reg}(j\omega)$  – частотна передавальна функція регулятора.

Отже, для того щоб мінімізувати  $\varepsilon_{rms}$ , необхідне виконання умови  $D_\varepsilon \rightarrow \min$ .

Через складність виразу (4), безпосередньо використовуватися для оптимального статистичного синтезу він не може. Тому для розв'язку цієї задачі була розроблена методика статистично оптимального синтезу на основі перетворень структурних схем електроприводу [4].

Розрахунки, проведені за цією методикою [4], показали, що при навантаженні, яке має експоненціальну кореляційну функцію, передавальною функцією статистично оптимального регулятора буде послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку та форсуючої ланки, а при навантаженні з експоненціально-косинусною кореляційною функцією – послідовне з'єднання аперіодичної ланки другого порядку та форсуючої ланки.

Оцінку резервів енергоспоживання за рахунок застосування методів статистично оптимального синтезу

асинхронних електроприводів з випадковим характером зміни навантаження проведено на прикладі моделювання роботи прямої дробарки зерна із асинхронним двигуном типу 4A80B2. Навантаження прямої дробарки має експоненціально-косинусну кореляційну функцію, яка відповідає статистичним характеристикам реалізацій, отриманих експериментально.

Моделювання роботи електроприводу прямої дробарки зерна при застосуванні статистично оптимального регулятора показало збільшення циклових показників енергоефективності електроприводу порівняно із електроприводами без регулятора таких, як цикловий ККД (на 8–12%) та коефіцієнт потужності (на 10–14%), та зменшення дисперсії вихідних параметрів електроприводу – електромагнітного моменту, струму, швидкості (на 60–70%), що свідчить про суттєву фільтрацію оптимальним регулятором високочастотних складових збурення. Окрім зниження додаткових втрат енергії така фільтрація призводить також до зниження навантажень на механічні вузли, що підвищує надійність електроприводу у цілому.

1. Андрющенко О.А., Бойко А.А., Бабичук О.Б. Особенности режимов минимизации потерь в асинхронных двигателях // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – 2004. – Вип. 62. – С. 24–28.
2. Браславский И.Я., Зюзов А.М., Костылев А.В. Разработка, исследование, внедрение систем «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» // *Электротехника*. – 2004. – № 9. – С. 13–17.
3. Пугачев В.С., Ситицын И.Н. Стохастические дифференциальные системы. – М.: Наука, 1985. – 559 с.
4. Шуруб Ю.В. Методика синтеза статистично оптимальних систем асинхронних електроприводів // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 17–23.

УДК 621.313

#### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПО НАПРЯЖЕНИЮ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Ю.В.Шуруб, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

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

*Показана возможность повышения эффективности работы асинхронных электроприводов, которые имеют стохастические моменты нагрузки, за счет создания замкнутых систем со статистически оптимальными регуляторами. Определены оптимальные структуры регуляторов электроприводов такого класса в зависимости от вида случайных возмущений. Моделирование работы электропривода дробилки зерна показало эффективность фильтрации статически оптимальным регулятором высокочастотных составляющих случайных моментов нагрузки, увеличение цикловых показателей энергоэффективности электропривода таких, как цикловые КПД и коэффициент мощности, уменьшение дисперсий его выходных параметров – электромагнитного момента, скорости, тока. Библ. 3, рис. 1.*

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, случайная нагрузка, оптимальный регулятор.

#### STATISTICAL OPTIMISATION OF VOLTAGE REGULATED INDUCTION ELECTRIC DRIVES

Yu.V.Shurub

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

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

*Possibility of increase of efficiency of work of induction electric drives which have the stochastic torques of load due to of creation of the closed systems with statistically optimum regulators is shown. Optimal structures of regulators of the electric drives of such class depending on a kind of random loads are defined. Simulation of work of the electric drive of a crusher of grain has shown efficiency of a filtration by statically optimal regulator of the high-frequency components of random torques of load, increase of cyclic indicators of energy efficiency of the electric drive, such as cyclic efficiency and power factor, reduction of dispersions of its outlet parameters - the electromagnetic torque, speed, current. References 4, figure 1.*

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

1. Andriushchenko O.A., Boiko A.A., Babiichuk O.B. Features of modes of minimisation of losses in induction motors // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – 2004. – № 62. – С. 24–28. (Rus)
2. Braslavskii I.Ya., Ziuzev A.M., Kostylev A.V. Working out, research, introduction of systems «thyristor voltage converter – induction motor» // *Elektrotekhnik*. – 2004. – № 9. – С. 13–17. (Rus)
3. Pugachev V.S., Sinityn I.N. Stochastic differential systems. – Moskva: Nauka, 1985. – 559 p. (Rus)
4. Shurub Yu.V. The technique of syntesis of statistically optimal systems of induction electric drives // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – № 2/2013 (22). – С. 17–23. (Ukr)

Надійшла 17.02.2014