

**МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
З ВИПАДКОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ
ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ОДНОФАЗНОЇ МЕРЕЖІ**

Ю. В. ШУРУБ, кандидат технічних наук, доцент
А. О. ДУДНИК, кандидат технічних наук, доцент
Д. С. ЛАВІНСЬКИЙ, асистент
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*
E-mail: dudnikalla@nubip.edu.ua

***Анотація.** Режими роботи багатьох електроприводів, що використовуються в механізмах сільськогосподарського виробництва та комунального господарства, характеризуються випадковою зміною моменту навантаження в широкому діапазоні. Це стосується й електроприводів на базі трифазного асинхронного двигуна, що живляться від однофазної мережі – трифазно-однофазних електроприводів з регульованими фазозміщуючими модулями.*

Інтенсивний стохастичний характер зміни збурень таких механізмів суттєво погіршує показники роботи їх електроприводів: вимагає завищення встановленої потужності електродвигуна, викликає удари в механічних частинах, кидки струму в двигуні та в мережі, що знижує якість споживаної енергії та збільшує втрати потужності. Підвищити ефективність та надійність їх роботи можливо шляхом збільшення перевантажувальної здатності електропривода в динамічних режимах для подолання викидів випадкових збурень.

Запропоновано спосіб подолання викидів стохастичного моменту навантаження у трифазно-однофазних асинхронних електроприводах за рахунок застосування дискретно регульованого фазозміщуючого модуля зі статистично оптимальним фільтром. Розроблено методику проектування трифазно-однофазного асинхронного електропривода з регульованим фазозміщуючим модулем, що дозволяє отримати симетричний режим у широкому діапазоні зміни навантаження при її випадковому характері. Використання алгоритму оптимальної фільтрації в замкнених системах однофазних асинхронних електроприводів дозволяє забезпечити мінімальну дисперсію коефіцієнта несиметрії та отримати ККД, близький до ККД двигуна при трифазному живленні, при інтенсивній зміні стохастичних навантажень.

Ключові слова: *асинхронний електропривод, фазозміщуючий модуль, стохастичне навантаження*

Актуальність. Асинхронний електропривод значної частини механізмів сільськогосподарського та комунального призначення має

навантаження, що змінюється за випадковим законом. У багатьох випадках живлення трифазних двигунів відбувається від однофазної мережі, а як фазозміщуючі елементи використовуються конденсатори з постійною чи регульованою ємністю. Відзначимо, що якість напруги мережі живлення часто не відповідає нормі, і коливання напруги в загальному випадку також мають стохастичний характер. При випадковому характері змін навантаження електродвигуна і напруги живлення вибір параметрів фазозміщуючих елементів являє собою складну задачу, і його доцільно проводити з урахуванням ймовірнісних характеристик збурень електропривода.

Вибір параметрів фазозміщуючих елементів базується на мінімізації дисперсії струму зворотної послідовності. Якщо зміна навантаження характеризується як випадковий стаціонарний процес, то процес зміни величин симетричних складових також можна описати стаціонарними випадковими функціями. Таким чином, задача зводиться до визначення чисельних характеристик випадкових величин, що мають функціональну залежність від іншої випадкової величини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Однофазне живлення асинхронних електроприводів дозволяє зменшити вартість електромережі та може застосовуватися при ускладнених умовах електропостачання, наприклад, у системах водопостачання та трубопровідного транспорту, у побуті та комунальному господарстві [1], у системах регулювання мікроклімату віддалених сільськогосподарських споживачів [2]. У однофазних дискретно регульованих електромеханічних системах актуальною є проблема уникнення частих перемикачів між елементами фазозміщуючого модуля при інтенсивній зміні навантаження [3].

Мета дослідження – розробка методики проектування асинхронного електропривода, що живиться від однофазної мережі, з дискретно регульованими фазозміщуючими елементами при врахуванні випадкового характеру зміни навантаження.

Матеріали і методи дослідження. При незмінній нарузі мережі живлення і постійних параметрах фазозміщуючих елементів величини струмів і напруг прямої та зворотної послідовностей визначаються однозначно через параметри двигуна при симетричному живленні. Знаючи закон розподілення випадкової величини – лінійного струму $I(t)$, можливо визначити числові характеристики випадкових величин – струмів прямої і зворотної послідовностей $I_1 = \varphi_1(I)$, $I_2 = \varphi_2(I)$. Так, математичне сподівання та дисперсія струму прямої послідовності визначаються виразами :

$$m_{I_1} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1 \cdot f \cdot dI ; \quad (1)$$

$$\sigma_{I_1}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1^2 \cdot m_{I_1}^2 \cdot f(I) dI , \quad (2)$$

де $f(I)$ – густина розподілення ймовірності лінійного струму $I(t)$.

Якщо функція $I_1 = \varphi_1(I)$ достатньо близька до лінійної в області практично можливих значень випадкових навантажень, то наближені значення оцінок математичного сподівання і дисперсії виражаються елементарними формулами.

Для лінійної функції вигляду $I_1 = b + aI$, що підпорядкована нормальному закону розподілення, математичне сподівання й середньоквадратичне відхилення визначаються виразами:

$$m_{I_1} = am_I + b; \quad (3)$$

$$\sigma_{I_1} = a^2 \sigma_I. \quad (4)$$

Якщо ж ці функції значно відрізняються від лінійних, то формули (3) і (4) можуть бути застосовані тільки при малих дисперсіях випадкових навантажень.

За запропонованою методикою проведено вибір параметрів фазозсуваючих елементів електропривода прямої дробарки зерна.

Визначені стохастичні оцінки процесу зміни навантаження як у статиці (математичне сподівання, дисперсія), так і в динаміці (кореляційна функція, спектральна густина).

Кореляційна функція і спектральна густина даних процесів добре апроксимуються виразами вигляду:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau, \quad (5)$$

$$S(\omega) = \frac{\sigma^2}{\pi} \left[\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2 + \beta^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2 - \beta^2} \right], \quad (6)$$

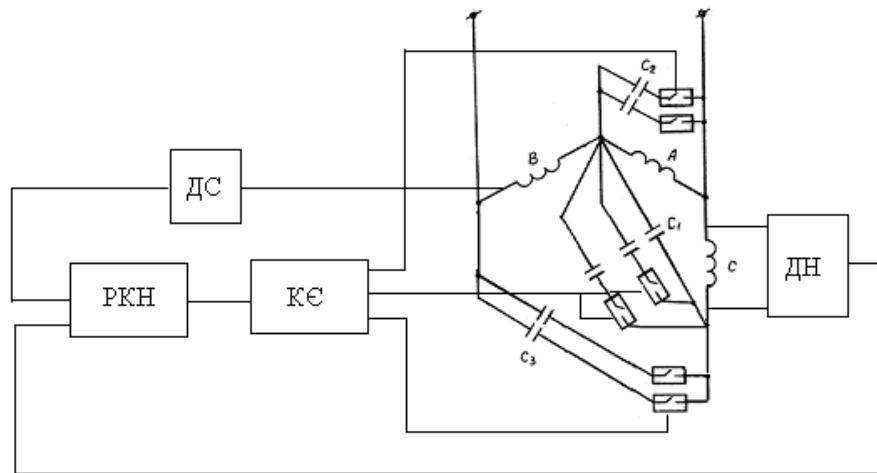
де α – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність згасання кореляційної функції;

β – коефіцієнт, що визначає кутову частоту коливань.

У цьому разі коефіцієнти α і β характеризують технологічний процес, що виконується електроприводом, а форма й вигляд кореляційної функції – стаціонарність та ергодичність процесу зміни навантаження.

Промодельовувавши роботу електропривода спільно з навантаженням, що має характеристики (5) – (6), за допомогою формуючого фільтра, можливо визначити параметри фазозміщуючих елементів, що мінімізують дисперсію струму зворотної послідовності. Надалі, за ступенем розкиду навантаження і за характером згасання кореляційної функції, проводиться коректування параметрів фазозміщуючих елементів залежно від зміни продуктивності привода.

Результати досліджень та їх обговорення. У [4] запропонована схема трифазно-однофазного електропривода з триелементним фазозміщуючим модулем із дискретним триступеневим регулюванням ємностей конденсаторів (див. рисунок).



Функціональна схема трифазно-однофазного електропривода з триелементним фазозміщуючим модулем

Регульованим параметром у даній схемі є коефіцієнт несиметрії, який визначається непрямо через момент навантаження, що, у свою чергу, контролюється за допомогою датчиків електричних величин – фазних напруг та струмів. Перемикання ступенів відбувається за допомогою керуючого пристрою, що включає в себе датчики тих фазних напруг і струмів (ДН та ДС), що є найбільш чутливими до зміни навантаження, мікропроцесорний регулятор коефіцієнта несиметрії (РКН), що визначає за показами датчиків необхідний ступінь фазозміщуючого модуля, та напівпровідникових комутаторів ємностей (КЄ).

При застосуванні даної схеми ККД АД в діапазоні 20–120 % від номінального навантаження не знижується більше, ніж на 3% від ККД того самого АД при симетричному навантаженні, а в трьох точках режим роботи АД є повністю симетричним.

Запропонована замкнена система керування може забезпечити симетричний режим роботи асинхронного двигуна в широкому діапазоні зміни навантаження і, відповідно, знизити його енергоспоживання та підвищити надійність його роботи. Але, оскільки розглядаються режими навантаження електроприводів, що мають різко змінний випадковий характер, система керування через наявність електромагнітної та механічної інерційності в замкненому контурі не дозволяє отримати оптимальний режим без відповідної фільтрації випадкової складової навантаження.

Отже, керуючий мікропроцесорний пристрій для врахування стохастичного характеру зміни навантаження повинен бути доповнений фільтром випадкової величини, який може бути поданий як статистично оптимальний регулятор [5]. Для розробки алгоритму оптимальної фільтрації використано критерій мінімуму середньоквадратичної похибки відтворення корисного сигналу. Тоді частотна передаточна функція фільтра визначається за формулою:

$$W(j\omega) = \frac{1}{\Psi(j\omega)} \left[\frac{S(\omega)}{\psi(-j\omega)} \right]^+, \quad (7)$$

де $S(\omega) = \Psi(j\omega) \cdot \Psi(-j\omega)$ – спектральна густина навантаження;

$\left[\frac{S(\omega)}{\Psi(-j\omega)} \right]^+$ – частина передаточної функції фільтра, що має полюси та нулі в правій напівплощині комплексної змінної $j\omega$ і може бути фізично реалізована з точки зору стійкої роботи фільтра.

Загальна модель електропривода та навантаження дозволяє визначити структуру системи керування трифазно-однофазних електроприводів в умовах дії стохастичних збурень з метою мінімізації струмів зворотної послідовності.

Розрахунки показали, що при навантаженні, яке має експоненціальну кореляційну функцію, передаточною функцією оптимального регулятора буде інерційна ланка, а при навантаженні з експоненціально-косинусною кореляційною функцією – послідовне з'єднання аперіодичної ланки другого порядку та форсуючої ланки.

Висновки і перспективи. Запропонована система керування трифазно-однофазним ЕП з триелементним дискретно регульованим фазозміщуючим модулем, де для забезпечення мінімальної дисперсії струму зворотної послідовності при стохастичній зміні навантаження в системі керування застосовано алгоритм оптимальної фільтрації, що дозволяє отримати в однофазному режимі ККД АД близький до ККД того самого АД при симетричному живленні при роботі в динамічному режимі зміни навантаження за випадковими законами, а також зменшити кількість перемикачів комутатора ємностей, що збільшує в цілому надійність запропонованої системи.

Список літератури

1. Malyar V., Namola O., Maday V. Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply / Proceedings of 2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2016). Sandomierz, Poland, 14–17th September, 2016. – P. 1–4.
2. Хижняк Т. А. Дистанційне керування електротехнічними пристроями в системах регулювання мікроклімату / Т. А. Хижняк, О. О. Гусев, І. С. Ліпінський // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 32–34.
3. Mazurenko L. I., Dzhura O. V., Shevchuk S. P. Transients in a Transistor-Switched Capacitor Regulator of a Stand-Along Induction Generator Supplying a Single-Phase Load / Proceedings of 2017 International conference on modern electrical and energy systems (MEES). Kremenchuk, November 15–17, 2017. – P. 244–247.
4. Шуруб Ю. В. Трифазно-однофазний асинхронний електропривод з багатоелементним ємнісним фазозміщуючим модулем / Ю. В. Шуруб // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 3. – С. 49–50.
5. Шуруб Ю. В. Багатокритеріальний синтез регульованих за напругою асинхронних електроприводів із стохастичним навантаженням / Ю. В. Шуруб, А. О. Дудник // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2016. – Вип. 252. – С. 204–209.

References

1. Malyar, V., Hamola, O., Maday, V. (2016). Calculation of capacitors for starting up a three-phase asynchronous motor fed by single-phase power supply. Proceedings of 2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2016). Sandomierz, Poland, 14–17th September, 1–4.
2. Hizhniak, T. A., Gusev, O. O., Lipins'kiy, I. S. (2016). Distantciine keruvannia elektrotehnichnimi pristroiimi v sistemah reguliuvannia mikroklimatu [Remote control of electrical devices in microclimate control systems]. Tehnichna elektrodinamika, 5, 32–34.
3. Mazurenko, L. I., Dzhura, O. V., Shevchuk, S. P. (2017). Transients in a Transistor-Switched Capacitor Regulator of a Stand-Alone Induction Generator Supplying a Single-Phase Load. Proceedings of 2017 International conference on modern electrical and energy systems (MEES). Kremenchuk, November 15–17, 2017, 244–247.
4. Shurub, Yu. V. (2011). Trifazno-odnofazniy asinhronniy elektroprivod z bagatoelementnim emnisnim fazozmishchuuchim modulem [Three-single-phase asynchronous electric drive with multi-element capacitive phase-shift module]. Electrotehnika i elektromehanika, 3, 49–50.
5. Shurub, Yu. V., Dudnyk, A. O. (2016). Bagatokriterialniy sintez reguliovanih za naprugoiu asinhronnih elektroprivodiv iz stohastichnim navantazhenniam [Multicriterion synthesis of voltage regulated induction electric drives with stochastic loads] . Naukovi visnik NUBiP Ukrainy, 252. – P. 204–209.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СО СЛУЧАЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

**Ю. В. Шуруб,
А. А. Дудник,
Д. С. Лавинский**

Аннотация. Режимы работы многих электроприводов, используемых в механизмах сельскохозяйственного производства и коммунального хозяйства, характеризуются случайным изменением момента нагрузки в широком диапазоне. Это касается и электроприводов на базе трехфазного асинхронного двигателя, питающихся от однофазной сети – трехфазно-однофазных электроприводов с регулируемыми фазосмещающими модулями.

Интенсивный стохастический характер изменения возмущений таких механизмов существенно ухудшает показатели работы их электроприводов: требует завышения установленной мощности электродвигателя, вызывает удары в механических частях, броски тока в двигателе и в сети, снижает качество потребляемой энергии и увеличивает потери мощности. Повысить эффективность и надежность их работы возможно путем увеличения перегрузочной способности электропривода в динамических режимах для преодоления выбросов случайных возмущений.

Предложен способ преодоления выбросов стохастического момента нагрузки в трехфазно-однофазных асинхронных электроприводах за счет

применения дискретно регулируемого фазосмещающего модуля со статистически оптимальным фильтром. Разработана методика проектирования трехфазно-однофазного асинхронного электропривода с регулируемым фазосмещающим модулем, позволяющим получить симметричный режим в широком диапазоне изменения нагрузки при ее случайном характере. Использование алгоритма оптимальной фильтрации в замкнутых системах однофазных асинхронных электроприводов позволяет обеспечить минимальную дисперсию коэффициента несимметрии и получить КПД, близкий к КПД двигателя при трехфазном питании, при интенсивной смене стохастических нагрузок.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, фазосмещающий модуль, стохастические нагрузки

METHOD OF DESIGNING AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH RANDOM LOADING POWERED FROM A SINGLE-PHASE NETWORK

Yu. Shurub,
A. Dudnyk,
D. Lavinskiy

Abstract. *The operating modes of many electric drives used in the mechanisms of agricultural production are characterized by a random load moment change in a wide range. This also applies to electric drives based on a three-phase asynchronous drives powered by a single-phase network - three-phase single-phase electric drives with adjustable phase-shift modules.*

The intensive stochastic nature of the perturbation changes significantly decrease the electric drives operation quality: requires excessive installed drive capacity, causes the blows in mechanical parts, engine and network current throws, reduces the quality of consumed energy and increases power losses. It is possible to increase the efficiency and reliability of their work by increasing the overload ability of the electric drive in dynamic modes to overcome the release of random perturbations.

The method of overcoming stochastic load torque emissions in three-phase single-phase asynchronous electric drives is proposed due to the use of a discretely adjustable phase-displacement module with a statistically optimal filter. The technique of designing a three-phase one-phase asynchronous electric drive with an adjustable phase separating module is developed, which allows to obtain a symmetric mode in a wide range of load variations with its random nature. Using the algorithm for optimal filtration in closed systems of single-phase asynchronous electric drives allows to provide a minimum dispersion of the asymmetry coefficient and obtain an efficiency close to the efficiency of the engine with three-phase power supply, with intense change of stochastic loads.

Keywords: asynchronous electric drive, phase-shift module, stochastic load