УДК 621-926

СПОСІБ СИНТЕЗУ РЕГУЛЯТОРА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ МЕХАНІЗМІВ БЕЗ ПРЯМОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ

БОРОДАЙ В.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;

БОРОВИК Р.О. інженер, асистент, асистент кафедри електропривода Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

НЕСТЕРОВА О.Ю. канд. пед. наук, доцент кафедри перекладу Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Мета роботи. *Розробка способу синтезу регулятора напруги живлення енергоощадного управління асинхронним приводом механізмів тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження і без потреби стабілізації швидкості.*

Методи досліджень. *Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, методи синтезу автоматичних систем, математичне моделювання у пакеті Matlab, методи статистичного аналізу.*

Отримані результати. *Розроблено спосіб та синтезовано за його алгоритмом регулятор напруги енергоощадного керування асинхронним приводом за умови коливання навантаження через хаотичну зміну технологічної задачі із одночасним забезпеченням допустимого зниження динаміки. Надано рекомендації щодо послідовності і схем увімкнення автоматичної системи в режимах запуску та сталої роботи, а також вибрано інтервал обмеження раціонального значення ковзання, яке забезпечує максимально можливу енергоефективність.*

Наукова новизна. *Запропоновано оригінальний спосіб визначення нелінійної перехідної функції регулятора напруги енергоощадного управління асинхронним приводом із забезпеченням допустимої динаміки в перехідних режимах та непрямою стабілізацією швидкості механізмів тривалого режиму роботи і мало-змінним графіком навантаження. Обґрунтовано вибір інтервалу обмеження раціонального значення ковзання і послідовності увімкнення схеми керування у залежності від поточного режиму роботи системи електроприводу.*

Практична цінність. *Використання запропонованого регулятора дозволить створити автоматичну систему асинхронного привода, завдяки якій можливо досягти збереження до 47 % активної потужності у випадку значного падіння навантаження.*

Ключові слова: механізми тривалого режиму роботи, мало-змінний графік навантаження, пошук і обґрунтування енергоефективного управління асинхронним приводом, розробка оригінального методу синтезу регулятора напруги.

I. ВСТУП

Відомо, що економіка України забезпечена власними енергоносіями приблизно на половину від необхідної потреби [1]. При цьому імпорт таких корисних копалин, як вугілля, газ, нафта становить від 20 % до 85 %, що у випадку форс-мажорних ситуацій може становити загрозу обмеження енергогенерації. Одночасно слід зауважити, що промисловість та житлове комунальне господарство (ЖКГ) користуються застарілими технологіями із низькою енергоефективністю. Як наслідок, сьогодні Україна має найвищу в Європі енергоємність на одиницю ВВП, що в понад тричі перевищує показники розвинутих держав світу. Таким чином, питання енергоощадності та енергоефективності має виняткову актуальність.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні виробничі механізми переважно рухаються завдяки електричному приводу [2]-[4], який споживає приблизно до 70 % від усієї електроенергії, що виробляється генеруючими компаніями. Логічно вважати, що напрям заснований на ресурсозбереженні засобами електропривода безумовно потребує подальшого розвитку.

Всебічний аналіз щодо енергоефективності та енергоощадності сучасного асинхронного електропривода може бути продемонстрований низкою відомих підходів [5]:

- залучення Європейського досвіду експлуатації нерегульованого приводу із середнім коефіцієнтом завантаження в 0,6 відносних одиниць;

- впровадження двигунів із підвищеним вмістом активних матеріалів [6], [7], які забезпечують падіння витрат до 30 % та підвищення ККД машини до 5 %. Проте одночасно слід зазначити, що за наявності позитивного ефекту, витрати енергії у самій робочій машині можуть залишатися досить великими, а розрахункова економія матиме місце у разі мало-змінного навантаження і буде помітною при правильно налагодженому силовому каналі;

- зниження витрат в мережі живлення за рахунок компенсації реактивної потужності;

© Бородай В.А., Боровик Р.О., Нестерова О.Ю., 2019
DOI 10.15588/1607-6761-2019-3-2

- інші способи передбачають зменшення тривалості режимів холостого ходу або перемикання схеми включення двигуна з трикутника на зірку на термін холостого ходу і незначної завантаженості [8] та використання режиму рекуперативного гальмування;

Найбільш енергоощадним, на теперішній час, вважається спосіб, який залучає регульований електропривод, де керування здійснюється за допомогою силових перетворювачів [9]-[11]. При цьому слід підкреслити, що намітилась світова тенденція до використання в керованих електроприводах переважно частотних перетворювачів. Але існують механізми тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження (різноманітні насосні та вентиляторні установки [12], [13]), де використання частотного перетворювача є досить дорогим та не завжди виправданим. Тому у цих випадках на перший план можуть виходити перетворювачі напруги, вартість яких приблизно втричі менше за вартість перетворювачів частоти. Хоча слід зазначити, що при фазочастотному методі керування такі перетворювачі мають гірший коефіцієнт потужності, а його підвищення можливе завдяки приєднанню ємнісних фільтрів. Інший підхід підвищення ефективності – використання регуляторів напруги, що побудовані на базі IGBT транзисторів із широтно-імпульсним методом керування. На жаль, їх вартість має незначне зменшення в порівнянні з вартістю частотних перетворювачів через схожість конструкції.

В регульованих системах припустимо використання комбінованого способу підвищення енергоефективності. Так, робота системи вентиляції локомотива [14], що живиться від синхронного генератора із змінною швидкістю обертання, досягається шляхом залучення системи частотного керування приводу вентилятора та підбором його двигуна, який має знижені значення активного та реактивного опору ротора. Такі умови в сукупності підвищують ККД та *cos(φ)* системи, але в цьому випадку є адаптованими до бортової мережі залізничного тепловоза.

Отже, весь наданий огляд підводить до висновку, що для досягнення максимального ефекту енергоефективності поставлена задача повинна вирішуватись комплексно. Тобто, необхідно розглядати систему на ділянках енергетичного каналу, силового перетворювача, двигуна та робочої машини. Автори роботи на даному етапі претендують тільки на покращення енергетики електричного двигуна. Інші питання планується розглядати на подальших стадіях досліджень.

Відомо, що для систем, де об'єктом керування є асинхронний двигун, використовують різноманітні закони керування. Це стабілізація оптимального значення ковзання, мінімальних струму статора або живильної потужності двигуна, які функціонально залежать від навантаження [15], [16]. Реалізація кожного з них може бути за наявності синтезованих регуляторів, для яких, у загальному випадку, використовують класичні методи теорії автоматичного управління. Однак загально прийняті способи синтезу регуляторів не завжди є раціональними, і тому інженерна практика потрібує пошуку більш зручних способів для винятковых умов використання.

III. МЕТА РОБОТИ

Розробка способу синтезу регулятора напруги живлення енергоощадного управління асинхронним приводом механізмів тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження і без потреби стабілізації швидкості.

IV. ВИКЛАД ГОЛОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Відомості щодо моделі двигуна. Дослідницька частина роботи базується на математичній моделі асинхронного двигуна (АД), де трифазна векторна система зазвичай перетворюється у двофазну [17]. Далі виходячи з рівнянь Парка-Горєва отримують електричну частину моделі АД.

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1\bar{i}_1 + \dfrac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_к\bar{\Psi}_1; \\ \bar{u}_2 = R_2\bar{i}_2 + \dfrac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j\bar{\Psi}_2(\omega_к - \omega_r p_n); \end{cases} \quad (1)$$

де $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$ – результуючі вектори напруг, струмів, потокозчеплень відповідно; R_1, R_2 – активні опори обмоток статора та ротора; p_n – кількість пар полюсів двигуна; ω_r, $\omega_к$ – кутові швидкості ротора і поля статора.

Механічну частину двигуна визначають через рівняння руху

$$M - M_C = J\frac{d\omega_r}{dt},$$

де M_C – момент опору на валу АД, J – момент інерції електропривода, приведений до вала АД.

У цьому випадку електромагнітний момент АД дорівнює векторному добутку потокозчеплення та струму статора:

$$M = \frac{3}{2}p_n\left(\bar{\Psi}_1 \times \bar{i}_1\right) \quad (2)$$

а вектори потокозчеплень записуються відповідно:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_1\bar{i}_1 + L_m\bar{i}_2; \\ \bar{\Psi}_2 = L_2\bar{i}_2 + L_m\bar{i}_1; \end{cases} \quad (3)$$

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$; $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$ – повні індуктивності обмоток статора та ротора; L_m – взаємна індуктивність між цими обмотками; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора.

На практиці з метою спрощення математичного розв'язання системи рівнянь (1)-(3) користуються не векторними виразами, а записують їх у проекціях. Так, для нерухомої системи координат, що пов'язана з обмотками статора, результуючі рівняння АД в проекціях на дійсну та уявну осі системи координат "α-β", набувають такого вигляду:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = R_1 i_{1\alpha} + \dfrac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + \dfrac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2\alpha} = R_2 i_{2\alpha} + \dfrac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \omega_r p_n \Psi_{2\beta}; \\ u_{2\beta} = R_2 i_{2\beta} + \dfrac{d\Psi_{2\beta}}{dt} - \omega_r p_n \Psi_{2\alpha}; \\ M = \dfrac{3}{2} p_n L_m k_\sigma \left(\Psi_{1\beta}\Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha}\Psi_{2\beta}\right), \end{cases} \quad (4)$$

де $k_\sigma = \dfrac{1}{L_1 L_2 - L_m^2}$.

Момент двигуна в рівняннях (4) визначається через проекції векторів потокозчеплення статора та ротора. Запис диференційних рівнянь через потокозчеплення забезпечує найкомпактніший їх вигляд. Але при цьому із системи рівнянь (3) додатково необхідно записати алгебраїчні вирази, котрі зв'язують струми з потокозчепленнями:

$$\begin{aligned} i_{1\alpha} &= k_\sigma\left(L_2\Psi_{1\alpha} - L_m\Psi_{2\alpha}\right); \\ i_{1\beta} &= k_\sigma\left(L_2\Psi_{1\beta} - L_m\Psi_{2\beta}\right); \end{aligned} \quad (5)$$

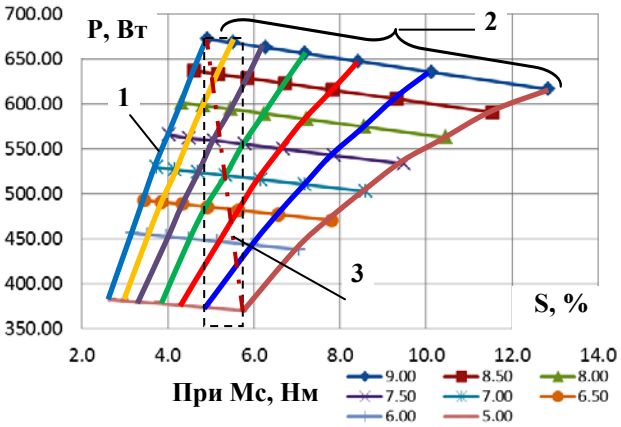
$$\begin{aligned} i_{2\alpha} &= k_\sigma\left(L_1\Psi_{2\alpha} - L_m\Psi_{1\alpha}\right); \\ i_{2\beta} &= k_\sigma\left(L_1\Psi_{2\beta} - L_m\Psi_{1\beta}\right). \end{aligned}$$

Параметри L_1, L_2, L_m двофазної моделі АД можливо розрахувати через параметри трифазного двигуна, що вказуються в каталогах і клієнтських формулярах за допомогою співвідношень:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_o}; \quad L_2 = \frac{X'_2 + X_\mu}{\omega_o}; \quad L_m = \frac{X_\mu}{\omega_o}, \quad (6)$$

де X_1 – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; X'_2 – приведений до обмотки статора індуктивний опір обмотки ротора; X_μ – головний індуктивний опір.

Програма досліджень та алгоритм синтезу регулятора. Як згадувалось раніше, ідея роботи полягає у регулюванні напруги живлення двигуна у залежності від зміни навантаження за одним із законів – мінімального струму статора або мінімальної потужності живлення. Для реалізації цього модель АД потрібно доповнити перетворювачем і регулятором напруги, де перехідна функція останнього може бути визначена за наступним алгоритмом. Для декількох фіксованих значень навантажень асинхронного двигуна у сталому режимі визначають потужність шляхом регулювання напруги завдання на вході перетворювача. Із даних джерела [15] напругу на виході перетворювача можливо знижувати до рівня 60 % від номінального значення. Виходячи з цього пошук мінімальних потужностей виконувався із врахуванням означених відомостей. Таким чином, програмою досліджень даного етапу передбачено, що момент навантаження регулюється у межах 0,9…0,5 від номінального з кроком 0,5 Н·м, а зміна завдання на перетворювач здійснювалась в інтервалі від 10 до 7 вольт із кроком в 0,5 вольта. Для попередньо виконаних дослідів двигуна 4А132М8У3 встановленої потужності 5,5 кВт, номінальної швидкості обертання 750 об/хвил, напруги живлення 220 В отримано ряд механічних характеристик, вигляд яких зображено на рис. 1, (1, 2).



P – механічна потужність; s – поточне ковзання; 1 – природна, 2 – штучні механічні характеристики; 3 – зона бажаного ковзання при регулюванні

Рисунок 1. Ілюстрація до визначення інтервалу зміни ковзання

Їх побудова базується на експериментально отриманих залежностях пошуку раціональної потужності живлення при досягненні ефективного керування.

Аналіз форм поміжних залежностей потужності від напруги і навантаження не виявив екстремумів функції. Тому підхід до подальшого вирішення задачі пошуку раціонального живлення виконаний шляхом вибору мінімальної потужності в діапазоні ковзань лімітованих межами 5,0…5,9 % (рис. 1, зона 3). Запропонований діапазон ковзань обрано із міркувань реалізації автоматичною системою приводу номінального режиму роботи двигуна при навантаженні близькому до номінального і гарантії отримання мінімально-можливої потужності живлення за умови наявності найменшого навантаження.

Врешті цикл попередніх випробувань дозволив отримати низку раціональних напруг регулювання

завдання залежних від навантаження, які формують у вигляді зведеної таблиці. Наступний крок синтезу перехідної функції регулятора напруги – побудова на основі даних зведеної таблиці лінії тренда і на її базі отримання математичної залежності за одним із відомих законів апроксимації (рис. 2).

Із усіх доступних методів найбільш вдалим став поліноміальний

$$U_z = 0{,}028M_c^{\,2} + 0{,}0868M_c + 5{,}8852\,, \qquad (7)$$

де отримано максимальний коефіцієнт детермінації рівня $R^2 = 0{,}9673$.

За функцією рівняння (7) розроблено кінцеву Matlab модель (рис. 3). Її дослідження показали, що на етапі старту двигуна найбільш раціональним є робота системи від задавача інтенсивності, що фактично реалізує функцію пристрою плавного пуску, а після досягнення сталого режиму пропонується вмикати регулятор, де в якості зворотного зв'язку заведене поточне значення навантаження. Позитивну роль для зниження динаміки при зміні напруги вносить цей же задавач інтенсивності, який у режимі регулювання приєднується послідовно з регулятором до перетворювача напруги, що можливо бачити на рис. 3.

Аналіз результатів досліджень. Випробування системи енергоефективного управління із двигуном 4А132М8У3 здійснювались в такій послідовності. Запуск системи від задавача інтенсивності під навантаженням в 7 Н·м, який триває приблизно 0,75 секунди, а далі протягом такого ж терміну підтримується сталий режим (рис. 4, а). Регулятор вмикався через 1,5 секунди після початку запуску і без зміни навантаження. Потім послідовно навантаження змінювалось на рівень 5 та 9 Н·м. Експоненціальні форми зміни напруги на виході перетворювача наглядно демонструють достатнє зниження динаміки системи при кожному переході від одного рівня навантаження до іншого. Практично незмінна величина швидкості свідчить, що при регулюванні напруги ковзання залишається у діапазоні, який було задекларовано вище. Кидки усіх фізичних величин мають практично задовільний рівень. Аналіз зменшення напруги при падінні навантаження дозволив зменшити активну потужність живлення до 47 %, а реактивну – до 51 % (рис. 4, б).

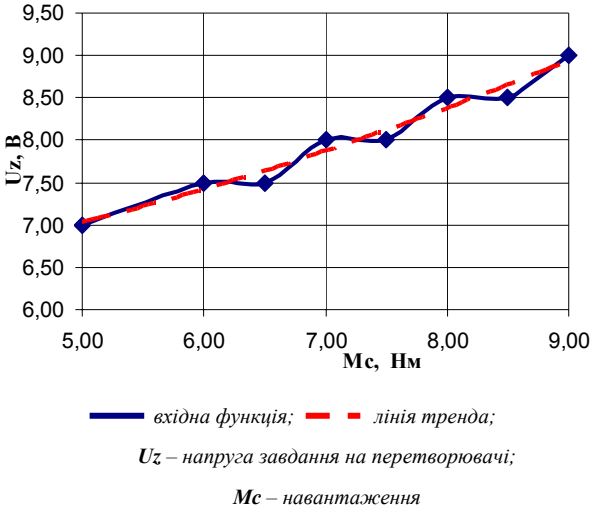
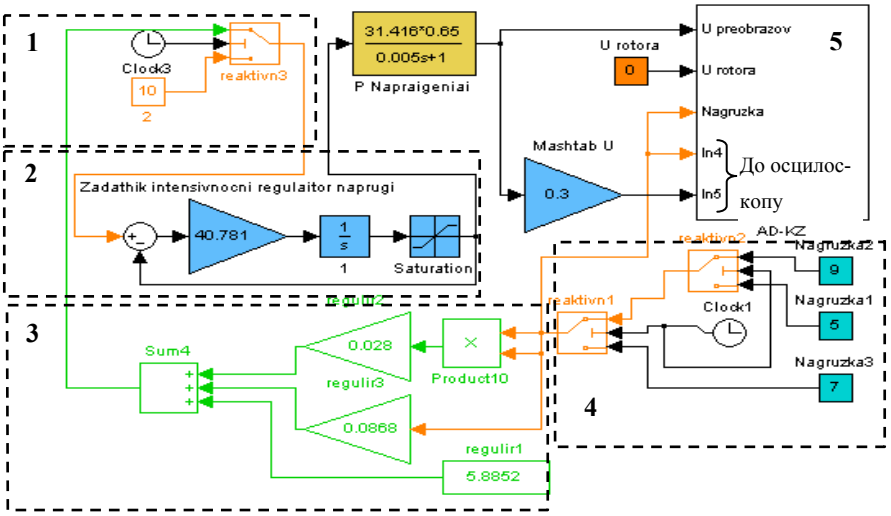
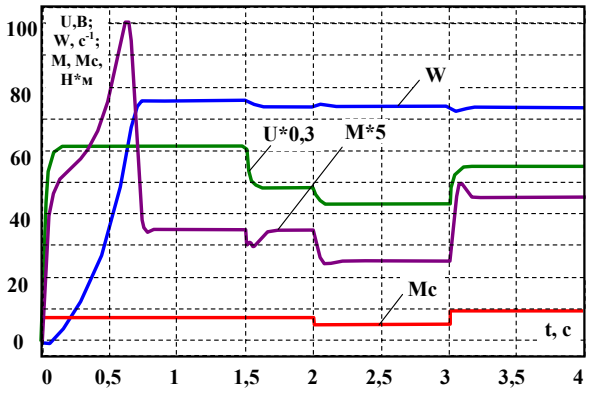


Рисунок 2. Графік визначення лінії тренда



1 – блок комутації запуску та регулювання; 2 – задавач інтенсивності; 3 – регулятор напруги; 4 – блок навантаження; 5 – АД-КЗ двигун

Рисунок 3. Модель автоматичної системи регулювання напруги живлення



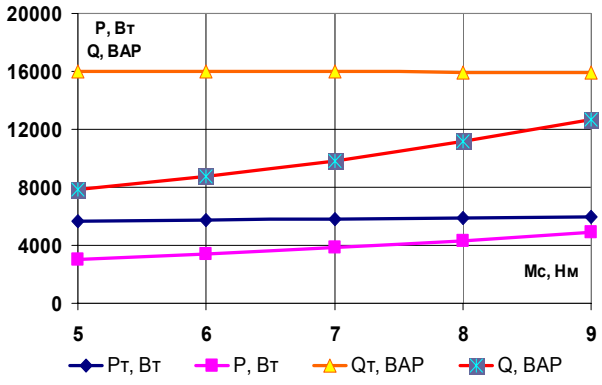
W – швидкість обертання двигуна;

U – напруга на виході перетворювача;

M – електромагнітний момент двигуна;

M_c – момент навантаження

а



активна та реактивна складові

***Pm, Qm** – традиційного живлення;*

***P, Q** – керованого живлення*

б

Рисунок 4. Графіки дослідження системи керування: а) – перехідних процесів; б) – потужностей живлення

V. ВИСНОВКИ

Не викликає сумніву, що управління асинхронним приводом засобами частотного керування дає найкращий результат енергетичної ефективності. Але у випадку електромеханічних систем тривалого режиму роботи із мало-змінним графіком навантаження пріоритетним може бути використання саме перетворювачів напруги, як альтернативи з позиції ціна-якість.

Оригінальний спосіб синтезу регулятора ефективного управління реалізується за алгоритмом, який передбачає:

- за відсутності автоматичного управління напруги для ряду фіксованих навантажень сталого режиму здійснюється пошук мінімальної потужності живлення шляхом зміни напруги завдання на перетворювачі;

- зважаючи на те, що залежності попереднього етапу досліджень носять монотонний характер, для досягнення мети отримання раціональної потужності живлення потрібно обмежити її вибір діапазоном ковзань, при якому забезпечується номінальний режим роботи системи приводу при навантаженні, близькому до номінального, з одного боку, і гарантії досягнення мінімально-можливої потужності за умови підтримки найменшого навантаження, з іншого боку;

- із отриманих зведених даних найменшої потужності для різних навантажень і за умови обраного ковзання будується лінія тренда, рівняння якої характеризується найбільшим коефіцієнтом детермінації.

Випробуваннями встановлено, що найбільш раціональним методом запуску системи є метод плавного пуску, а вмикання регулятора рекомендується здійснювати у сталому режимі із послідовно увімкненим задавачем інтенсивності, який забезпечить потрібне зниження динаміки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Барский, В.А. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины [Текст] / В.А. Барский, А.С. Бешта, Н.В. Горбачов и др. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков: Наук. 2013. – №9 (115). – С. 2-11.

[2] Стратегия энергосбережения в Украине: аналитически-справочные материалы в 2-х томах. Общие основы энергосбережения / за ред. В.А. Жовтнянського, М.М. Куліка, Б.С. Стогнія – К.: Академперіодіка, 2006. – Т. 1. – 510 с.

[3] Клепиков, В.Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине / В.Б. Клепиков, В.Ю. Розов // Вестник НТУ «ХПИ»: Тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 18–21.

[4] Бешта, О.С., Економічні й екологічні аспекти комплексної генерації та утилізації енергії в умовах урбанізованих територій. Монографія. / О.С.Бешта, Г.Г. Півняк та ін. – Дніпропетровськ, НГУ, 2013. – 220 с.

[5] Козярук, А.Е. Метод и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронным электроприводом / А.Е. Козярук, Б.Ю. Васильев // Вестник ЮУРГУ. Сер. «Энергетика». – 2015. – Т.15, №1. – С. 47-53. DOI: 10.14529 /

power 150106.

[6] http://www.ruselprom.ru/support/biblioteka-polzovatelya/Elektrodvigateli-7ave-energosberegayushchie - resheniya-kontserna-ruselprom/

[7] Новая высокоэффективная серия асинхронных двигателей 7AVE, ее модификации и специализированные исполнения / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // Труды VIII Межунар. (XIX Всерос.) науч.-техн. конф. по автоматизир. электроприводу. – Саранск, 2014. – С. 239-243.

[8] Бабокин, Г.И. Оценка экономии электрической энергии в нерегулируемом асинхронном электроприводе путем переключения обмоток статора // ГИАБ. 2005. №7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruemom-asinhronnom-elektroprivode-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora (дата обращения: 08.07.2019).

[9] Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков: под ред. И.Я. Браславского. – М.: Академия. 2004 – 256 с.

[10] Vasilev B. Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons / B. Vasilev // Electrotechnic and computer systems. – 2014. – № 15(91). – P. 220-223.

[11] Kozyaruk A. Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units / A. Kozyaruk, B. Vasil'ev // Russian Electrical Engineering. February. – 2013. – Vol. 84. – Iss.2. – P.94-102. DOI: 10.3103/S10683 71213020077

[12] Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов— М.: Машиностроение, 2013. — 176 с.

[13] Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 256 с.

[14] Дзенис, С.Е. Выбор асинхронного двигателя привода вентилятора тепловоза с условием обеспечения его устойчивой работы // С.Е. Дзенис, В.В. Шевченко, О.О. Ханин – Харьков: Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, Наук. – техн. зб. – Вип. 4(45) – 2015 – С. 92-96.

[15] Казачковський, Н.Н. Сопоставление законов частотного управления на примере преобразователя частоты Altivar 21. / Н.Н. Казачковський // Гірнича електромеханіка та автоматика, Наук. – техн. зб. – Вип. 100. – 2018 – С. 69 – 72.

[16] Бабокин, Г.И. Оценка экономии энергетической энергии в системе регулятор напряжения асинхронный двигатель // ГИАБ. 2006. №1. URL: https:// cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyator-napryazheniya-asinhronnyy-dvigatel-1 (дата обращения: 08.07.2019).

[17] Башарин, А.В. Управление електроприводам: Учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовський – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 26.06.2019

СПОСОБ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА ЕНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ МЕХАНИЗМОВ БЕЗ ПРЯМОЙ СТАБИЛИЗАЦИЙ СКОРОСТИ

БОРОДАЙ В.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода Национального ТУ «Дніпровська політехніка», Днепр, Украина, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;

БОРОВИК Р.А. инженер, ассистент, ассистент кафедры электропривода Национального ТУ «Дніпровська політехніка», Днепр, Украина, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

НЕСТЕРОВА О.Ю. канд. пед. наук, доцент кафедры перевода Национального ТУ «Дніпровська політехніка», Днепр, Украина, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Цель работы. *Разработка способа синтеза регулятора напряжения питания энергосберегающего управления асинхронным приводом механизмов длительного режима роботы с мало изменяющимся графиком нагрузки и без необходимости стабилизации скорости.*

Методы исследования. *Для проведения исследований использованы положения теории электрических машин, методы синтеза автоматических систем, математическое моделирование в пакете MatLab и методы статистического анализа.*

Полученные результаты. *Разработан способ и синтезирован по его алгоритму регулятор напряжения энергосберегающего управления асинхронным приводом при условии колебательности нагрузки из-за хаотического изменения технологической задачи с одновременным обеспечением допустимого уменьшения динамики.*

Даны рекомендации к последовательности и схемному включению автоматической системы в режимах запуска и установившейся работы, а так же выбран интервал ограничения рационального значения скольжения, которое обеспечит максимально возможную энергоэффективность.

Научна новизна. *Предложен оригинальный способ определения нелинейной переходной функции регулятора напряжения энергосберегающего управления асинхронным приводом с обеспечением допустимой динамики в переходных режимах и косвенной стабилизацией скорости механизмов длительного режима работы и с мало меняющимся графиком нагрузки. Обоснован выбор интервала ограничения рационального значения скольжения и последовательности включения схемы управления в зависимости от текущего режима работы системы электропривода.*

Практическая ценность. *Использование предложенного регулятора позволит создать автоматическую систему асинхронного привода, благодаря которой возможно достичь сбережения до 47 % активной мощности в случае значительного падения нагрузки.*

Ключевые слова: механизмы длительного режима работы, мало меняющийся график нагрузки, поиск и обоснование энергоэффективного управления асинхронным приводом, разработка оригинального метода синтеза регулятора напряжения.

SYNTHESIS METHOD FOR ENERGY EFFICIENT CONTROL OF ASYNCHRONOUS DRIVE OF MECHANISMS WITHOUT DIRECT SPEED STABILIZATION

BORODAI V.A. PhD in technical sciences, associate professor**,** associate professor of the Electric Drive department**,** the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: Boroday_va2@ukr.net;

BOROVYK R.O. Engineer, assistant lecturer of the Electric Drive department, the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

NESTEROVA O.YU. PhD in Pedagogy, associate professor of the Translation Department, the National Technical University «Dnipro polytechnic», Dnipro, Ukraine, e-mail: olnesterova1@rambler.ru.

Purpose. *Development of a method for the synthesis of power supply voltage regulator for energy-saving control of asynchronous drives of long-term operation mechanisms with a slightly varying load curve and without the need for speed stabilization.*

Methodology. *For the research, the provisions of the theory of electrical machines, methods of synthesis of automatic systems, mathematical modeling in the MatLab package and methods of statistical analysis were used.*

Findings. *The method was developed and the voltage regulator of energy-saving control of asynchronous drive was synthesized according to its algorithm under the conditions of load oscillation due to the chaotic change of the technological task and ensuring the permissible dynamics due to the intensity setter, which is installed in series with the regulator. Recommendations are given for the sequence and circuit switching on for the automatic system in the start-up and steady-state operation modes, and also the interval of limiting the rational slip value is selected, which will ensure the highest possible energy efficiency.*

Originality. *An original method is proposed for determining the transition function of voltage regulator for energy-saving control of an asynchronous drive with the provision of permissible dynamics in transient conditions and indirect stabilization of the speed of long-term operation mechanisms and with a low-variation load curve. The choice of the interval for limiting the rational slip value and the sequence of switching on the control circuit depending on the current mode of operation of the electric drive system is substantiated.*

Practical value. *The use of the proposed controller will allow the creation of the automatic asynchronous drive system, which can save you up to 47 % of power in case of significant load drop.*

Keywords: the long-term operation mechanisms, little variable load schedule, search and justification of energy-efficient control of the asynchronous drive, development of the original method for the voltage regulator synthesis.

REFERENCES

[1] Barsky, V.A., Beshta, A.S., Gorbachov, N.V., Zagirnyak, M.V., Klepikov, V.B., Lozinsky, O. Yu., Mekhovich, S.A., Peresada, S.M., Sadovoy, A.V., Tolochko, O.I. (2013). Jelektroprivod kak jener?sberegajushhij faktor v promyshlennosti i ZhKH Ukrainy [Electric drive as an energy saving factor in the industry and housing and public utilities of Ukraine]. *Energy saving. Energy. Energy audit, 9(115), 2-11.*

[2] Zhovtnyansky, V.A., Kulik, M.M., Stogniya, B.S. (2006). Strategija jenergosberezhenija v Ukraine: analiticheskispravochnye materialy v 2-h tomah. Obshhie osnovy jenergosberezhenija [Energy saving strategy in Ukraine: analytical and reference materials in 2 volumes. General principles of energy saving]. *Academiperiodic, 1, 510.*

[3] Klepikov, V.B., Rozov, V.Yu. (2010). O roli jelektroprivoda v reshenii problemy jenergoresursosberezhenija v Ukraine [On the role of the electric drive in solving the problem of energy saving in Ukraine]. *Bulletin of NTU "KPI": issue "Problems of an automated electric drive. Theory and practice", 28, 18-21.*

[4] Beshta, O.S., Pivnyak, G.G., etc. (2013). Ekonomichni j ekologichni aspekty kompleksnoi' generacii' ta utylizacii' energii' v umovah urbanizovanyh terytorij. Monografija [Economic and environmental aspects of integrated generation and utilization of energy in urbanized areas. Monograph]. *Dnipropetrovsk, NMU, 220.*

[5] Kozaruk, A.E., Vasiliev, B.Yu. (2015). Metod i sredstva povyshenija jenergojeffektivnosti mashin i tehnologij s asinhronnym jelektroprivodom [Method and means of improving the energy efficiency of machines and technologies with asynchronous electric drive]. *Bulletin of SUSU. Ser. "Energy", 15, 1, 47-53. DOI: 10.14529 / power 150106.* (in Russian).

[6] http://www.ruselprom.ru/support/biblioteka-polzovatelya/Elektrodvigateli-7ave-energosberegayushchie - resheniya-kontserna-ruselprom/ (in Russian).

[7] Bespalov, V.Ja. (2014). Novaja vysokojeffektivnaja serija asinhronnyh dvigatelej 7AVE, ee modifikacii i specializirovannye ispolnenija [New high-performance series of 7AVE asynchronous motors, its modifications and specialized versions]. *Trudy VIII Mezhunar. (HIH Vseros.) nauch.-tehn. konf. po avtomatizir. jelektroprivodu. – Saransk, 239-243*. Kobelev, A.S., Kruglikov, O.V., Makarov, L.N. (2014) (in Russian).

[8] Babokin, G.I. (2005). Ocenka jekonomii jelektricheskoj jenergii v nereguliruemom asinhronnom jelektro-privode putem perekljuchenija obmotok statora [Estimation of electrical energy savings in unregulated asynchronous electric drive by switching the stator windings]. *GIAB. 7.* URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/otsenka-ekonomii-elektricheskoy-energii-v-nereguliruemom-asinhronnom-elektroprivode-putem-pereklyucheniya-obmotok-statora (date of the application: 08.07.2019). (in Russian).

[9] Braslavsky, AND I., Ishmatov, Z.Sh., Polyakov V.N. (2004). Jenergosberegajushhij asinhronnyj jelektroprivod [Energy saving asynchronous electric drive]. *Academy, 256.* (in Russian)

[10] Vasilev, B. (2014). Structure and three-level inverter control algorithm electric power facilities transportation of hydrocarbons. *Electrotechnic and computer systems,*15(91), 220-223.

[11] Kozyaruk, A. (2013). Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units. *Russian Electrical Engineering, February, 84, Iss.2., 94-102. DOI: 10.3103/S10683 71213020077.* Vasilyev, B.Yu., Kozaruk, A.E. (2013).

[12] Leznov, B.S. (2013). Chastotno-reguliruemyj jelektroprivod nasosnyh ustanovok [Variable Frequency Electric Pumping Units]. *Engineering, 176.* (in Russian)

[13] Leznov, B.S. (2006). Jenergosberezhenie i reguliruemyj privod v nasosnyh i vozdushnyh ustanovkah [Energy saving and controlled drive in pump and air units]. *Energoatomizdat, 256.* (in Russian)

[14] Dzenis, S.E., Shevchenko, V.V., Hanin, O.O. (2015). Vybor asinhronnogo dvigatelja privoda ventiljatora teplovoza s usloviem obespechenija ego ustojchivoj raboty [Selection of asynchronous motor of drive of diesel locomotive fan with the condition of ensuring its stable operation]. *Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces, 4(45), 92-96.*

[15] Kazachkovsky, N.N. (2018). Sopostavlenie zakonov chastotnogo upravlenija na primere preobrazovatelja chastoty Altivar 21 [Comparison of the laws of frequency control. Case study of the frequency converter Altivar 21]. *Girnicha elektromehanika that automation, 100, 69-72.*

[16] Babokin, G.I. (2006). Ocenka jekonomii elektricheskoj jenergii v sisteme reguljator naprjazhenija asinhronnyj dvigatel' [Evaluation of energy saving in the system voltage regulator - asynchronous motor]. *GIAB. 1.* URL: https:// cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomii-energeticheskoy-energii-v-sisteme-regulyator-napryazheniya-asinhronnyy-dvigatel-1 (date of the application: 08.07.2019). (in Russian)

[17] Basharin, A.V. (1982). Upravlenie elektroprivodam: Uchebnoe posobie dlja vuzov [Drive Management: A Textbook for Universities]. *Energoizdat, Leningrad. Detachment, 392.* Basharin, A.V., Novikov, V.A., Sokolovskiy, G.G. (1982). (in Russian)