

O.V. Bibik

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

DESIGNING OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS BASED ON PROPORTIONAL RECALCULATION TECHNIQUE

At the stage of preliminary design of valve-induction motors, it is proposed to use a method of proportional conversion to determine their constructive data in accordance with the nominal values of power and rotor speed. The methodology is based on the connection of the energy indices of the basic and new machines, which is geometrically similar to it, with their linear dimensions, current, the number of turns and the active resistance of the winding. The results of the design are confirmed by studies of operating modes using an imitation model using nonlinear parameters, calculated by the finite element method. References 6, figure, table.

Key words: switched reluctance motor, proportional recalculation technique, simulation model, nonlinear parameters, quasi-static regimes.

1. Ilynskyi N.F., Shtaynbrunn, Prudnikova Y.I., Fedorov A.G., Bychkova E.V. Designing of switched reluctance machines for general industrial purposes. *Vesnik MEI*. 2004. No 1. P. 37–43. (Rus)
2. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. Features of designing an inductor machine for switched reluctance motor. *Izv. universities. Electromechanics*. 2008. No 1. Pp. 60–68. (Rus)
3. Fisenko V.G., Popov A.N. Designing of switched reluctance motors. Moskva: Publishing house MEI. 2005. 56 p. (Rus)
4. Development of Methods and Tools for Enhancing Energy Efficiency of Electromechanotronics Energy Transformers. *Research Report (Final)* Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. DR № 0107U000071. 2008. 153 p. (Ukr)
5. Pinchuk O.I., Bibik O.V. Development of the switched reluctance motor for the compressor of the domestic refrigerator. *Abstracts of the VIII All-Ukrainian sciences. conf. Scientific developments of youth at the present stage*. 23-24 april. 2009. Kiev: KNUTD. P. 40. (Ukr)
6. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Zhukov L.O. Investigation of quasi-static modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electromechanical and energy saving systems*. Thematic issue Problems of Automated Electric Drive: Theory and Practice. 2012. Pp. 416–418. (Ukr)

Надійшла 25.02.2019

Received 25.02.2019

УДК 621.313: 004.896

КВАЗІЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СКРЕБКОВИХ І ГВИНТОВИХ КОНВЕЄРІВ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

М.М. Заблудський^{1*}, докт. техн. наук, **В.Є. Плюгін^{2**}**, докт. техн. наук, **Д.І. Морозов³**, канд. техн. наук, **К.В. Худобін³**, канд. техн. наук

¹ – Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ-41, 03041, Україна
e-mail: zabludskiyinn@gmail.com

² – Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна
e-mail: vladyslav.pliuhin@kname.edu.ua

³ – Донбаський державний університет,
пр. Леніна, 121, Лисичанськ, Луганська обл., Україна
e-mail: dimorozov3@gmail.com

Розроблено математичну модель систем імпульсно-фазового керування і досліджено динамічні режими асинхронних машин у складі електроприводу скребкового і гвинтового конвеєрів. Встановлено, що застосування квазічастотного керування забезпечує досягнення стабільної низької швидкості й покращення пускових властивостей приводу порівняно із застосуванням двошвидкісних двигунів. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: математична модель, квазічастотне керування, асинхронна машина, масивний ротор, динамічний режим.

На сьогодні найпоширенішим варіантом приводу скребкового конвеєра (СК) є електропривод (ЕП) з використанням двошвидкісного асинхронного двигуна (АД), застосування якого знижує динамічні навантаження в тяговому органі без застосування пружних ланок і забезпечує дві швидкості переміщення тягового органу, але не захищає тягові ланцюги СК від обривів, має гірші енергетичні характеристики не тільки на маневровій швидкості, але і на робочій, він значно дорожчий, ніж одношвидкісний двигун відповідної потужності. Концепція створення нового вибухозахищеного електрообладнання [1], яка базується на аналізі світових тенденцій у галузі розробки і реалізації електроприводів, показала чітку орієнтацію на застосування регульованого електроприводу СК на основі тиристорних пристроїв плавного пуску АД. Номінальна частота обертання двошвидкісних АД сучасних скребкових конвеєрів складає 1500/500 об / хв. Це забезпечує робочу (1...2) м/с і маневрову (0,3...0,6) м/с швидкість переміщення тягового органу, величина якої відповідає вимогам техніки безпеки [2]. Тенденції щодо збільшення продуктивності підземного транспорту пов'язуються зі збільшенням робочої швидкості руху ланцюгових конвеєрів, яка в перспективі має скласти (2...4) м/с [1]. При цьому маневрова швидкість руху тягового органу має залишитися незмінною. Досягти цього можливо шляхом зменшення частоти обертання двигуна на зниженій швидкості. Аналогічна проблема забезпечення маневрової швидкості спостерігається і в гвинтових конвеєрах, де за умовами технологічного процесу необхідна низька швидкість. Одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності й продуктивності технологічних систем для переробки сипких і в'язких речовин є створення вбудованих електромеханічних систем гвинтових конвеєрів (ГК), в яких використовується дисипативна складова енергії, а головне, є можливість досягнення низьких швидкостей обертання без механічного редуктора [3]. Застосування досконалих частотно-регульованих ЕП з тиристорним перетворювачем частоти (ТПЧ) для СК і ГК визнано економічно не вигідним, оскільки ТПЧ мають високу вартість, яка не виправдана через те, що більшу частину часу конвеєр працює від мережі. У цілому така система тиристорного ЕП досить складна, а значить, і менш надійна. Але проблема зниження динамічних навантажень в тяговому органі за перехідних режимів пуску, реверсу, гальмування і застибування конвеєра стоїть дуже гостро, оскільки пов'язана зі значними простоями об'єкта [4]. Тиристорний пристрій плавного пуску дає змогу знизити пусковий струм і динамічні навантаження у разі пуску, проте зниження напруги призводить до зменшення пускового моменту і до збільшення часу [5]. М'який пуск Triol AC25 призначений для плавного пуску з обмеженням пускового струму і гальмування високовольтих АД [6]. В [7] показано, що поряд з методами векторного керування для досягнення необхідних низьких частот обертання і динамічних властивостей приводу застосовані прості та економічні методи на основі формування квазісинусоїдального сигналу. Квазічастотне керування асинхронним двигуном якоюсь мірою поєднує в собі переваги методів регулювання параметрів і частоти [8]. Результати моделювання в Matlab/Simulink характеристик асинхронного двигуна на основі запропонованого матричного перетворювача з прямою матрицею квазіджерел представлені в [9]. Відомі розробки квазічастотного керування (КЧК) електроприводом кранових механізмів, машин відцентрового лиття валків [10-11]. У роботі [12] наведено обґрунтування раціональності КЧК приводом транспортних рудничних пристроїв і показано, що воно дає змогу запобігти перевантаженням тягового ланцюга у випадку його заклинювання. Оцінка ефективності використання квазічастотного приводу в СК і ГК може бути проведена шляхом аналізу його експлуатаційних показників, таких як: рівень пускових характеристик; можливість забезпечення робочої і маневрової швидкості переміщення тягового органу; циклічного реверсивного режиму, здатність зниження динамічних навантажень.

Мета роботи полягає в аналізі впливу законів формування квазісинусоїдальної напруги на динамічні характеристики асинхронного електроприводу конвеєрів.

Знижена частота АД досягається тим, що напруга, яка живить двигун, формується з напруги мережі шляхом пропускання двох напівхвиль одного напрямку, а потім двох напівхвиль протилежного напрямку за п'ять періодів. За таким принципом можна формувати як фазну, так і лінійну напругу. Перша гармоніка квазісинусоїдальної напруги має частоту 10 Гц. Для стабільної роботи АД на зниженій швидкості у разі КЧК у випадку з ТРН важливо

підтримувати магнітний потік двигуна на одному рівні, при цьому величина першої гармоніки живлячої напруги задається відповідним моментом ввімкнення тиристорів. Пропонується принцип формування квазісинусоїдальної напруги в системі живлення одношвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, при якому шляхом фазоімпульсного керування в системі «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» з мінімальною кількістю елементів перемикавання забезпечується дискретний зсув вектора магнітного потоку на кут 60 ел. град. і перехід на стійку знижену частоту обертання ротора на рівнях 1/3 і 1/5 від номінальної. Пропонується також відповідний закон квазічастотного керування асинхронним електроприводом скребкового конвеєра у перехідних режимах, в якому гармонічні коливання з дискретно регульованою початковою фазою і оптимальним гармонічним складом симетричної напруги живлення асинхронного двигуна формуються функціями перемикавання груп тиристорів з розбиттям періоду модуляції відповідно на шість або десять інтервалів з урахуванням коливань частоти мережі:

$$\begin{aligned} U_{2a}(t) &= mU_{1a}(t) \cdot H_{1a}(t) \\ U_{2b}(t) &= mU_{1b}(t) \cdot H_{1b}(t) \\ U_{2c}(t) &= mU_{1c}(t) \cdot H_{1c}(t) \end{aligned},$$

де $U_{2a}(t)$, $U_{2b}(t)$, $U_{2c}(t)$ – вихідна напруга на відповідних фазах навантаження; $mU_{1a}(t)$, $mU_{1b}(t)$, $mU_{1c}(t)$ – матриці складових напруги; $H_{1a}(t)$, $H_{1b}(t)$, $H_{1c}(t)$ – вектори функції перемикавання.

Матриці складових напруги мають вигляд

$$mU_{2a}(t) = \begin{vmatrix} U_a - U_b & U_a - U_c \\ 2 & 2 \end{vmatrix}; \quad mU_{2b}(t) = \begin{vmatrix} U_b - U_a & U_b - U_c \\ 2 & 2 \end{vmatrix}; \quad mU_{2c}(t) = \begin{vmatrix} U_c - U_a & U_c - U_b \\ 2 & 2 \end{vmatrix}.$$

Вектори функції перемикавання такі:

$$H_{2a}(t) = \begin{vmatrix} h_{2ab}(t) \\ h_{2ac}(t) \end{vmatrix}; \quad H_{2b}(t) = \begin{vmatrix} h_{2ab}(t) \\ h_{2bc}(t) \end{vmatrix}; \quad H_{2c}(t) = \begin{vmatrix} h_{2ac}(t) \\ h_{2bc}(t) \end{vmatrix},$$

де $h_{ab}(t)$ – функція перемикавання між фазами a та b ; $h_f(t)$ – функція перемикавання для відрізків часу, коли напруга на фазах навантаження дорівнює фазній напрузі мережі; $h_{ac}(t)$ – функція перемикавання між фазами a та c ; $h_{bc}(t)$ – функція перемикавання між фазами b та c .

Досліджено чотири варіанти *Simulink*-моделей і макетних зразків СІФУ (СІФУ-1 – керуючі імпульси подаються на три тиристори через Т/6 с, які ввімкнені у різні фази, причому два тиристори ввімкнено в одному напрямку, інший – у зворотному; СІФУ-2 – керування здійснюється вмиканням тиристорів керуючим імпульсом, який подається у разі переходу фазної напруги через нуль; СІФУ-3 – тиристори відкриваються на момент проходження лінійної напруги через нуль, напруга формується з двох напівхвиль одного знака. Робоча пара тиристорів підбирається таким чином, щоб кожні 0,01667 с результуючий магнітний потік повертався на 60 ел. град. На рис. 1 представлено форму напруги живлення за найбільш ефективним варіантом системи керування тиристорами ПЧ (СІФУ-3.2) та спектральний склад напруги перетворювача частоти, керованого різними типами СІФУ. У

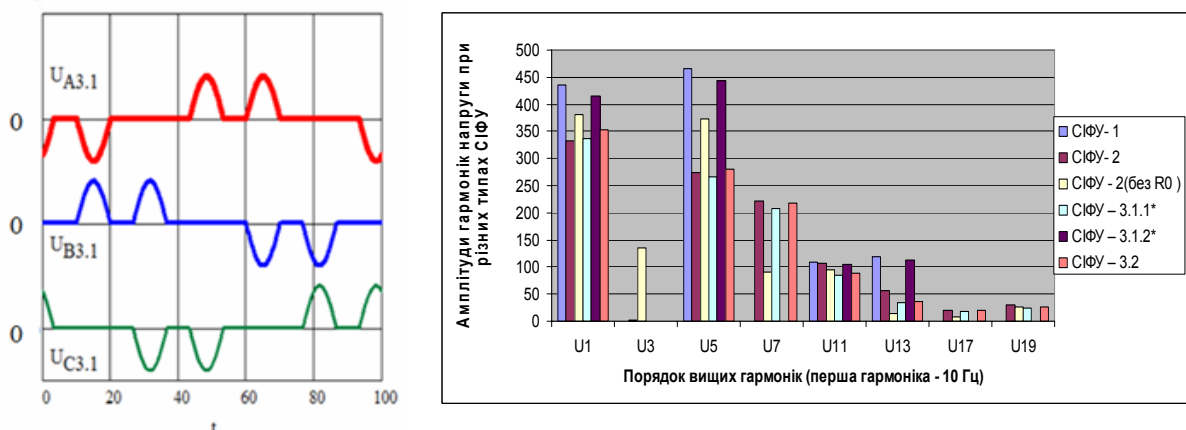


Рис. 1

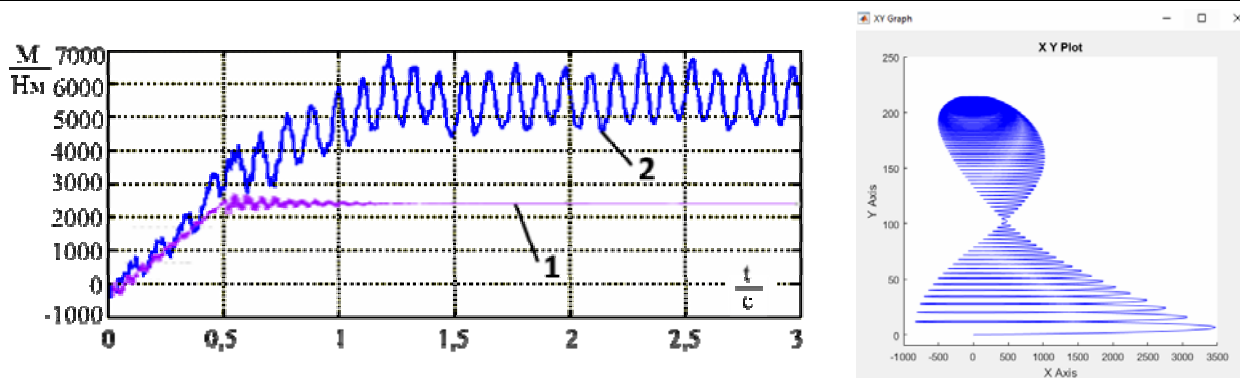


Рис. 2

випадку розбивання періоду на 10 інтервалів часу тривалість одного інтервалу становить 0,01 с. Початок інтервалу визначається проходженням напруги U_{AB} через нуль, а перший інтервал починається у разі зміни напруги від позитивної до негативної. Система імпульсно-фазового керування забезпечує склад вищих гармонік квазічастотної напруги, у якому 5- та 7-ма гармоніки мають практично однакові амплітуди, що дає змогу компенсувати їх вплив на механічну характеристику електроприводу. Характеристики зміни середнього моменту у разі живлення двигуна від мережі (залежність 1) та СІФУ 3.2 (залежність 2), а також механічна характеристика двигуна показані на рис. 2.

Підвищення пускових властивостей є одним з основних критеріїв якості приводу СК. У більшості двигунів з подвійною кліткою по мірі розгону електромагнітний момент починає знижуватися від 2,74 до 1,85 кНм, а потім починає зростати до 2,73 кНм. У той же час у разі живлення двигуна від перетворювача частоти з квазічастотним керуванням величина електромагнітного моменту у разі розгону двигуна зростає від 2,2 до 5,5 кНм. Середній момент за час пуску у разі живлення двигуна від ТЧ з квазічастотним керуванням буде більший, ніж при живленні від мережі. У випадку заклинювання в місці заштибовки спостерігається ударне зростання зусилля, спричинене накопиченою кінетичною енергією ротора. У випадку живлення від мережі номінальної частоти зусилля зростає у середньому до 2600 Н·м, а у разі живлення від ПЧ з СІФУ – до 5500 Н·м. Це дає можливість у випадках близько 88 % заклинювання запустити СК.

Для інтегральної оцінки якості пускових властивостей приводу скребкового забійного конвеєра серії СП330 з трьома АД потужністю 160 кВт пропонується ввести коефіцієнт якості пуску, що визначається співвідношенням середніх значень електромагнітного моменту до квадрату струму за період пуску. Одношвидкісний двигун має кращі показники добротності (зростання в 1,3 разу) і коефіцієнта якості пуску (зростання в 1,4 разу) у разі квазічастотного керування, ніж двошвидкісний двигун. Аналіз енергетичних характеристик показує, що одношвидкісний двигун має більш високі енергетичні характеристики на робочій частоті обертання, наприклад, ККД одношвидкісного двигуна складає 94 % проти 91 % у двошвидкісного, коефіцієнт потужності – 0,85 проти 0,8.

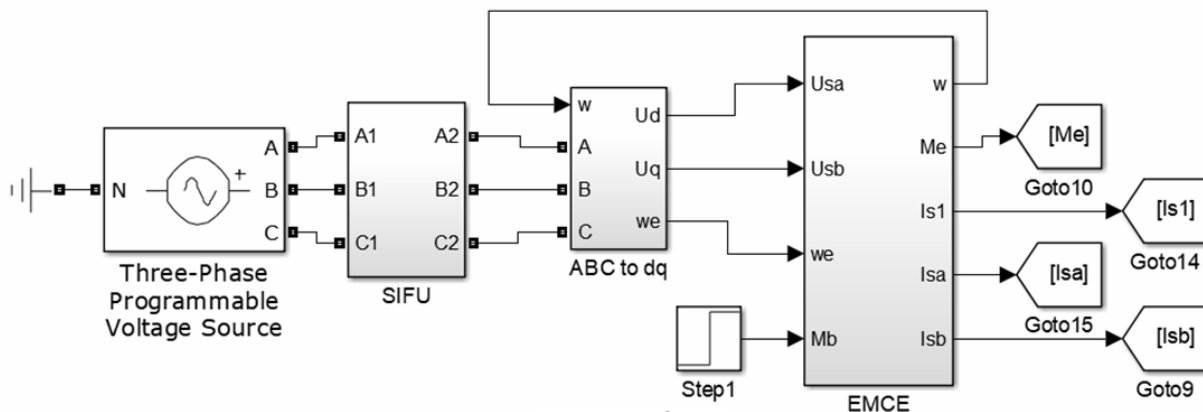


Рис. 3

На рис. 3 зображена імітаційна модель двомо-дульного гвинтового шне-кового конвеєра

[3], який живиться від системи квазі-частотного керування у програмі Simulink. У цьому пристрої два обернених статора (модуля конвеєра) знаходяться на загальному валу та розміщені всередині порожнистої тонкостінної феромагнітної труби, на поверхні якої знаходяться витки гвинта. Статори живляться трифазною напругою так, що їх магнітні поля направлені зустрічно один одному [3].

У моделі на рис. 3 система квазічастотного керування представлена блоком SIFU, трифазний сигнал на виході якого перетворюється у систему прямокутних координат d, q та подається на вхід блока гвинтового конвеєра ЕМСЕ. Характеристику зміни швидкості та електромагнітного моменту пристрою від часу наведено на рис. 4. Завдяки використанню режиму противімкнення двох модулів конвеєра стало можливим отримання швидкості обертання ротора на рівні 200 об/хв без застосування механічного редуктора (рис. 4). Наявність системи квазічастотного керування забезпечує стабілізацію цієї швидкості. Використання дисипативної складової енергії електроприводу в технологічному процесі забезпечує високий загальний ККД приводу.

Висновки. Розрахунок коефіцієнта якості пуску (M_p/I_{p2}) показав, що у разі квазічастотного керування він вищий у 1,4 разу, а коефіцієнт добротності (M_p/I_p) – у 1,3 разу в порівнянні з двошвидкісним двигуном. Встановлено досить високу збіжність результатів дослідження динамічного режиму пуску з експериментальними даними.

Аналіз енергетичних характеристик показує, що одношвидкісний двигун має більш високі енергетичні характеристики. Середній коефіцієнт потужності та ККД електроприводу за цикл роботи СК з використанням одношвидкісного двигуна і квазічастотного керування з урахуванням частих пусків зростають відповідно на 4 і 3 %. Тому експлуатаційні витрати в робочих режимах у СК з двошвидкісним двигуном будуть більші, ніж у СК з одношвидкісним двигуном і ці витрати впливають на собівартість продукції.

Застосування системи квазічастотного керування в системі живлення двомодульного гвинтового конвеєра дало змогу отримати низьку швидкість обертання зовнішнього гвинтового ротора (200 об/хв) у разі одночасного збереження моменту обертання, близького за значенням до номінального моменту пристрою (250 Нм).

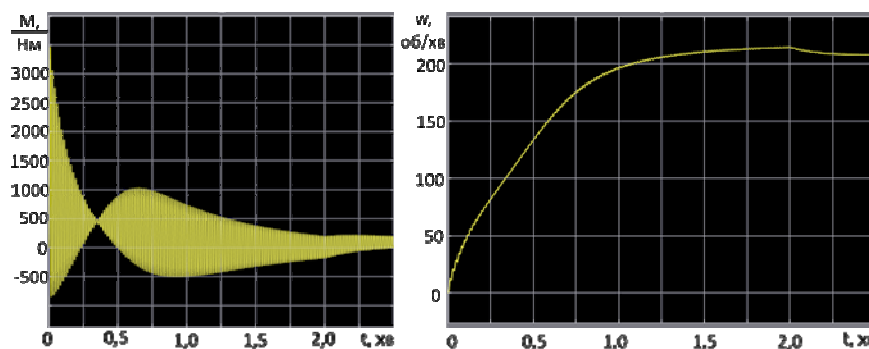


Рис. 4

1. Концепция развития подземного конвейерного транспорта. Центр Транспортных Систем. 2012. Режим доступа: <http://www.trssystem.ru/index.php/ru/production/conveyor-transport>.
2. Об утверждении Правил безопасности в угольных шахтах. Приказ №257 от 16.11.2004, зарегистрированный в Министерстве юстиции Украины 23.03.2005 за №327/10607.
3. Zablodskiy N., Plyugin V., Gritsyuk V. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes. *Russian Electrical Engineering*. 2016. No 87(3). Pp. 140–144.
4. Dolipski M., Remiorz E., Sobota P. Dynamics of non-uniformity loads of AFC drives. *Archives of Mining Sciences*. 2014. Vol. 59. No 1. Pp. 155–168.
5. Устройство плавного пуска Siemens 3RW/SIRIUS. Режим доступа: <http://www.privod.su/Siemens3RW>.
6. The «quasi-frequency» starting methods. Triol AC25 Soft Starter (Slow Starter, Thyristor Starter). Catalogue 2015.04. Режим доступа: https://triolcorp.com/wp-content/uploads/2015/04/catalog_AC25_2015_04.pdf.
7. Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. New York: Pearson Publications. 2013.
8. Firago B., Vasiljev D., Pawlaczyk L. Zastosowanie impulsowego regulatora napięcia dla miękkiego rozruchu i hamowania silników. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych*. No. 62. Studia i Materiały. No 28. Politechnika Wrocławska. 2008. Pp. 378–386.
9. Bhavssar A., Khampariya P. Induction Motor Fed by Matrix Converter, Modeling, Simulation and Implementation. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*. 2017. Vol. 3, Issue 4. Pp. 1079–1083.
10. Хуссейн К.Я. Обоснование области применения квазичастотного способа управления автоматизированным электроприводом. https://otherreferats.allbest.ru/radio/00081387_0.html.

11. Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Анисимов Д.М. Сравнительная характеристика способов пуска машины центробежного литья валков. *Известия ТулГУ*. 2010. Вып. 3. Ч. 3. С. 162–174.
12. Маренич К.Н., Бережной А.В. Исследование процессов при квазичастотном электропитании асинхронного двигателя скребкового конвейера. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна*. 2007. Вип. 14 (127). С. 161–166.

УДК 621.313: 004.896

Н.Н. Заблодский¹, докт. техн. наук, **В.Е. Плюгин**², докт. техн. наук, **Д.И. Морозов**³, канд. техн. наук, **К.В. Худобин**³, канд. техн. наук.

¹ – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 15, Киев-41, 03041, Украина

² – Харьковский национальный университет городского хозяйства им. О.М. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61002, Украина

³ – Донбасский государственный университет, пр. Ленина, 121, Лисичанск, Луганская обл., Украина

КВАЗИЧАСТОТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СКРЕБКОВЫХ И ВИНТОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Разработана математическая модель систем импульсно-фазового управления и исследованы динамические режимы асинхронных машин в составе электропривода скребкового и винтового конвейеров. Установлено, что применение квазичастотного управления обеспечивает достижение стабильной низкой скорости и улучшение пусковых свойств привода в сравнении с применением двухскоростных двигателей. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: математическая модель, квазичастотное управление, асинхронная машина, массивный ротор, динамический режим.

M. Zablodskyi¹, **V. Pliuhin**², **D. Morozov**³, **K. Khudobin**³

¹ – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroiv Oborony Str., Kyiv-41, 03041, Ukraine

² – O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

³ – Donbas State Technical University, Lenin Av., 121, Lysychansk, Luhansk region, Ukraine

QUASI-FREQUENCY INDUCTION ELECTRIC DRIVE CONTROL OF SCRAPER AND SCREW CONVEYORS IN TRANSIENT MODES

A mathematical model of the of pulse-phase control systems is developed, dynamic modes of induction machines in the electric drive of scraper and screw conveyors are investigated. It is established that the use of quasi-frequency control ensures the achievement of a stable low speed and the improvement of the starting properties of the drive in comparison with the use of double-speed motors. References 12, figures 4.

Key words: mathematical model, quasifrequency control, induction machine, solid rotor, transient mode.

1. The concept of the underground conveyor transport development. Transportation Systems Center. 2012. Access Mode: <http://www.trsystem.ru/index.php/ru/production/conveyor-transport>. (Rus)
2. On approval of safety rules in coal mines. Order num.257, 16.11.2004, registered with the Ministry of Justice of Ukraine 23.03.2005, num. 327/10607. (Rus)
3. Zablodskiy N., Plyugin V., Gritsyuk V. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes. *Russian Electrical Engineering*. 2016. No 87(3). Pp. 140–144.
4. Dolipski M., Remiorz E., Sobota P. Dynamics of non-uniformity loads of AFC drives. *Archives of Mining Sciences*. 2014. Vol. 59. No 1. Pp. 155–168.
5. Siemens 3RW/SIRIUS soft starter device. Access mode: <http://www.privod.su/Siemens3RW>. (Rus)
6. The «quasi-frequency» starting methods. Triol AC25 Soft Starter (Slow Starter, Thyristor Starter). Catalogue 2015.04. Access mode: https://triolcorp.com/wp.../10/catalog_AC25_2015_04.pdf.
7. Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. *New York: Pearson Publications*. 2013.
8. Firago B., Vasiljev D., Pawlaczyk L. Zastosowanie impulsowego regulatora napięcia dla miękkiego rozruchu i hamowania silników. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych*. No. 62. Studia i Materiały. No. 28. Politechnika Wrocławska. 2008. Pp. 378–386.
9. Bhavssar A., Khampariya P. Induction Motor Fed by Matrix Converter, Modeling, Simulation and Implementation. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*. 2017. Vol. 3, Issue. 4. Pp. 1079–1083.
10. Hussein K.Y. Justification of the quasi-frequency method scope of controlling an automated electric drive. Access mode: https://otherreferats.allbest.ru/radio/00081387_0.html. (Rus)
11. Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Anisimov D.M. Comparative characteristics of the machine starting methods for centrifugal casting rolls. *Izvestiya TulGU*. 2010. Issue 3. Part 3. Pp. 162–174. (Rus)
12. Marenich K.N., Berezhnoy A.V. Processes research of quasi-frequency power supply of an induction motor of a scraper conveyor. *Naukovі pratsі Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu*. Seriya: Gірnicho-elektromekhanіchna. 2007. Issue 14 (127). Pp. 161–166. (Rus)