

УДК 621.313.33:51

ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА, ОПТИМІЗОВАНОГО ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМІЗАЦІЇ СПІВВІДНОШЕННЯ МОМЕНТ–СТРУМ

Д-р техн. наук Д. В. Тугай, О. О. Шкурпела

RESEARCH OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, OPTIMIZED ACCORDING TO THE CRITERION OF MAXIMIZING TORQUE-PER-AMP

Dr. Sc (Tech.) D. Tugay, Senior Assistant O. Shkurpela

Досліджено роботу асинхронного електропривода на базі автономного інвертора напруги з векторною системою керування та двигуна АД-906У в режимах його повного та часткового використання за потужністю на математичній моделі у програмному середовищі MATLAB. Показано, що характеристика $|\psi_R|=f(P_{dc})$ має суттєвий вплив на характер протікання перехідного процесу асинхронного електропривода при роботі з потужністю нижчою за номінальну. Такі режими є характерними для тягового привода автономного електричного транспорту. Для підвищення ефективності тягового асинхронного електропривода автономного електротранспорту пропонується проведення оптимізації його системи управління за критерієм максимізації співвідношення момент – струм з урахуванням характеристики $|\psi_R|=f(P_{dc})$. Подано кількісну оцінку відхилення коефіцієнта потужності двигуна при зміні величини споживаної потужності.

Ключові слова: асинхронний електропривод, математичне моделювання, оптимізація, МТРА, автономний рухомий склад.

In the article the research of the work of the asynchronous electric drive on the basis of the autonomous voltage inverter with the vector control system and the AD-906U engine in the modes of its full and partial use by power on a mathematical model is software environment the MATLAB. It is shown that the characteristic $|\psi_R|=f(P_{dc})$ significantly affects the nature of the transition process of an asynchronous electric drive when operating at powers below nominal. Such modes are characteristic of a traction drive of an autonomous electric transport. To increase the efficiency of an asynchronous electric drive of an autonomous electric transport, it is proposed to optimize its control system according to the criterion of maximizing Torque-per-Amp relationship taking into account the characteristic $|\psi_R|=f(P_{dc})$. The quantitative estimation of the deviation of the engine power factor ratio when the power consumption is changed is given. Thus, at 25% of the motor power from the nominal, optimization by the criterion of maximizing Torque-per-Amp, taking into account the characteristic $|\psi_R|=f(P_{dc})$, allows increasing the power factor by 14% than the non-optimized asynchronous electric drive under similar conditions. When an asynchronous electric drive is operated at a power close to the nominal, optimization by the criterion of maximizing Torque-per-Amp does not significantly affect the value of the power factor, but it allows to increasing the electromagnetic torque of the motor in starting. The proposed optimization method can be applied to traction asynchronous electric drives, as well as to auxiliary drives of autonomous locomotives. This will improve the energy efficiency of the traction asynchronous electric drive of the autonomous rolling stock and reduce the cost of fuel and lubricants.

Keywords: asynchronous motor, mathematical modeling, field weakening, autonomous rolling stock.

Вступ. Відомо, що асинхронний електропривод, що працює у режимі зі змінним навантаженням, має низькі показники коефіцієнта потужності. Тому для подолання цього недоліку найчастіше проводять оптимізацію системи керування автономного інвертора напруги. Одним з найпоширеніших методів оптимізації скалярних систем керування є Закон Костенка, серед векторних методів слід зазначити максимізацію співвідношення момент–струм (англ. *MTPA*) та максимізацію ККД, але усі ці методи фактично зводяться до корегування магнітного стану асинхронного двигуна. Щодо тягового асинхронного електропривода автономного рухомого складу, то зміна моменту опору навантаження тягового асинхронного двигуна (ТАД) впливає лише на прискорення рухомої одиниці, окрім випадків нештатних режимів (боксування, юз та ін.). На перший план виходить величина потужності ТАД, що визначається режимом роботи автономного джерела живлення, тому для ефективного використання ТАД при оптимізації системи керування необхідно враховувати зміну величини підведеної потужності.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблемі оптимізації асинхронного електропривода присвячено значну кількість праць відомих вітчизняних та закордонних вчених та спеціалістів у галузі автоматизації та теорії електроприводів. Синтез оптимізованих систем керування (що використовують векторні методи регулювання) виконується з урахуванням особливостей роботи електропривода, що безпосередньо впливають на його ефективність [1]. Так, для загальнопромислових електроприводів у [2] запропоновано підхід до формування величини оптимального, за критерієм *MTPA*, потокозчеплення ротора залежно від величини електромагнітного моменту асинхронного двигуна $|\psi_R|=f(M)$. У [3] досліджено вплив ефекту насичення асинхронного двигуна на вигляд залежності $|\psi_R|=f(M)$. Автором [4] вказано переваги

систем тягового електропривода, оптимізованих за критерієм максимізації ККД, хоча принциповими недоліками такого підходу є індивідуальне настроювання кожного електропривода в ході стендових випробувань. У [5] зазначається необхідність врахування величини потужності ТАД при корегуванні величини потокозчеплення ротора. Аналіз досліджень та публікацій вказує на недостатнє висвітлення питання щодо оптимізації тягових асинхронних електроприводів з автономними джерелами живлення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є оцінка впливу характеристики $|\psi_R|=f(P_{dc})$, яка задовольняє оптимізацію за критерієм *MTPA* системи керування тяговим асинхронним двигуном АД-906У в режимі роботи зі зменшеною потужністю. Завданням дослідження є визначення кількісної оцінки коефіцієнта потужності асинхронного двигуна АД-906У при роботі з повною та зменшеною потужністю.

Основна частина дослідження. Дослідження проведено на розробленій у [6] імітаційній моделі в програмному середовищі MATLAB. Для проведення порівняльного аналізу було використано імітаційну модель тягового асинхронного електропривода, що аналогічна до запропонованої, але використовує «класичну» стратегію керування з непрямою (англ. – *indirect FOC*) орієнтацією по полю машини без оптимізації за критерієм *MTPA*, з урахуванням нелінійності магнітного кола двигуна.

На рис. 1 подано характеристики розгону двигуна АД-906У з використанням стратегії *IFOC* при $|\psi_R|=const$ та оптимізованої за критерієм *MTPA*. Для обох випадків розгін відбувався з обмеженням потужності двигуна на рівні 230 кВт. Особливо слід пояснити характеристику $U_{dc}=f(t)$. Вхідна напруга автономного інвертора U_{dc} формується двома зонами. Для першої зони характерне підтримання джерелом живлення постійної величини напруги U_{dc} до моменту виходу інвертором на повну шпаруватість.

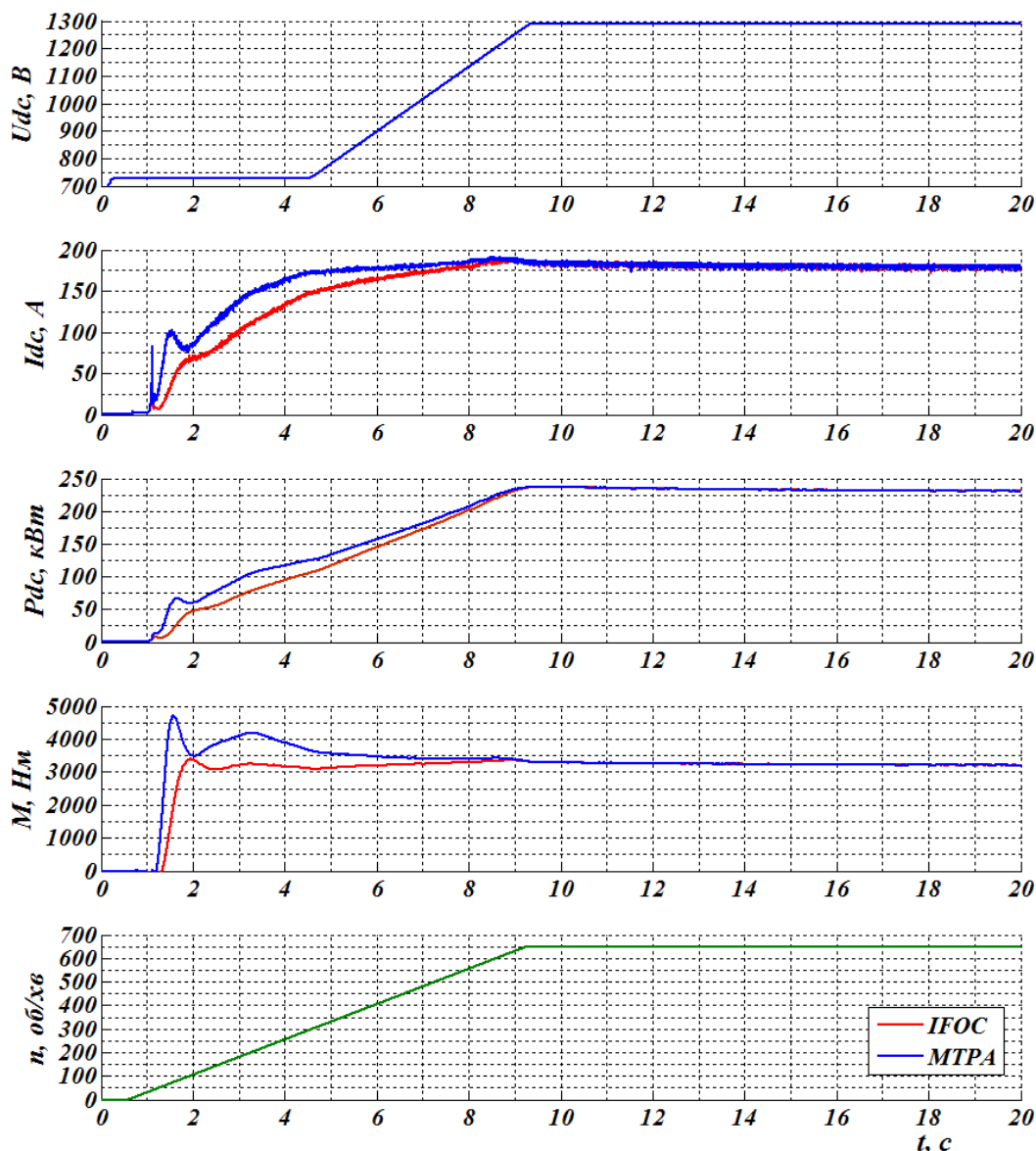


Рис. 1. Характеристики процесу розгону двигуна АД-906У при номінальній потужності

Подальше збільшення напруги на асинхронному двигуні досягається за рахунок регулювання амплітуди вихідної напруги джерела живлення з 4.5 с модельного часу на рис. 1. Такий підхід дав змогу зменшити динамічні втрати в автономному інверторі та знизити габаритну потужність тягового генератора дизель-поїзда ДЕЛ-02 [7]. Оптимізація за критерієм МТРА дає можливість збільшити електромагнітний момент двигуна в режимі пуску (рис. 1), в той час як характеристика $\cos\varphi=f(n)$, що подана на рис. 2, при

номінальній потужності несуттєво відрізняється від системи з *IFOC*.

Для тягових електроприводів автономного рухомого складу характерними є режими часткового використання потужності джерела живлення. Рис. 3 містить характеристики розгону двигуна АД-906У з обмеженням потужності двигуна на рівні 25% від номінальної – 57.5 кВт. Обмеження характеристики $U_{dc}=f(t)$ в цьому випадку обумовлено навантажувальною характеристикою джерела живлення – дизель-генератора.

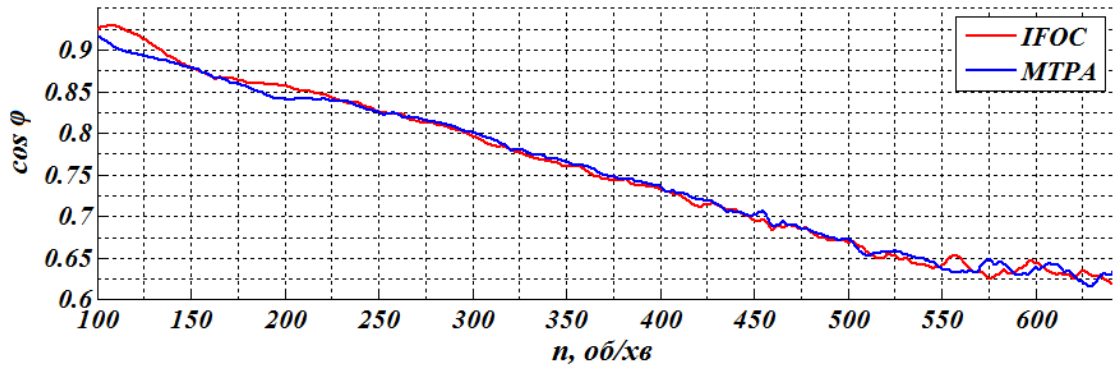


Рис. 2. Характеристика $\cos \varphi = f(n)$ при номінальній потужності

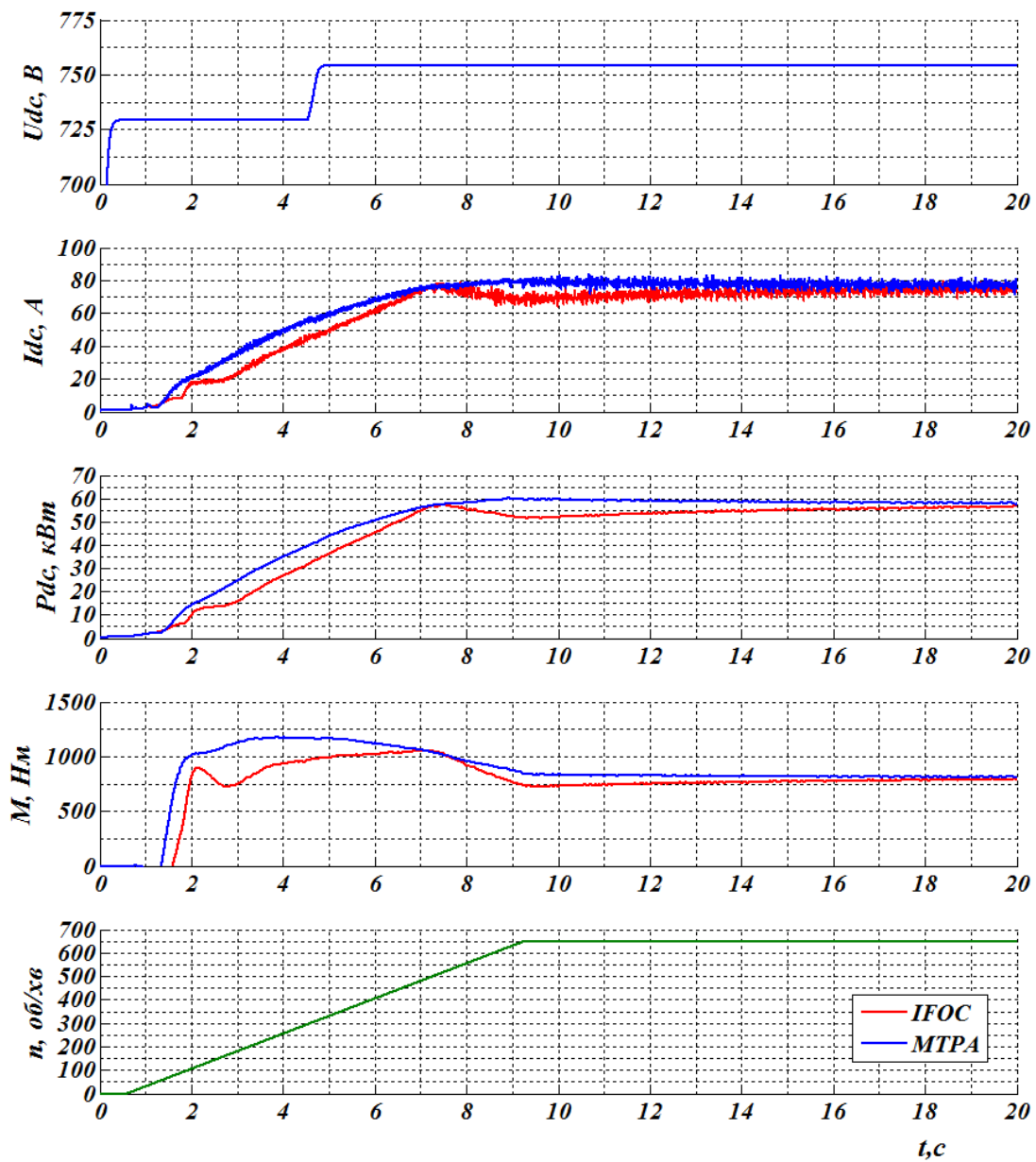


Рис. 3. Характеристики процесу розгону двигуна АД-906У при потужності 25 % від номінальної

Окремо слід зазначити, що незалежно від потужності тягового електропривода та стратегії керування, після завершення перехідного процесу доступна потужність джерела живлення реалізується повністю.

На рис. 4 подано характеристику $\cos\varphi=f(n)$ при зменшеній потужності. З отриманої характеристики випливає, що при застосуванні стратегії *МТРА* двигун має збільшений на 14 % $\cos\varphi$ в процесі розгону.

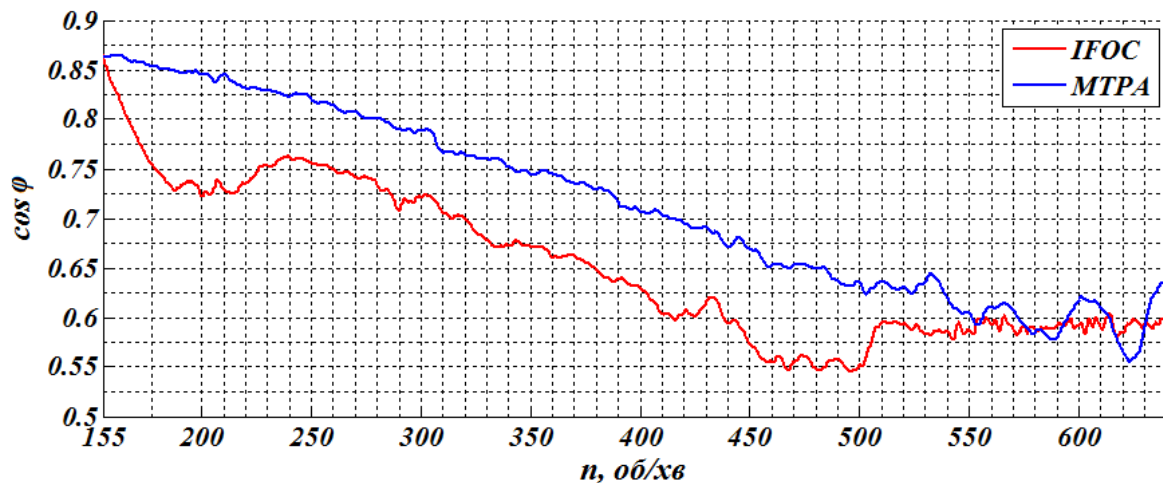


Рис. 4. Характеристика $\cos\varphi=f(n)$ при потужності 25 % від номінальної

Висновки. Таким чином, у ході проведеного дослідження виявлено, що для автономних асинхронних електроприводів характеристика $|\psi_R|=f(P_{dc})$ має суттєвий вплив на характер протікання перехідних процесів. Побудова характеристики $|\psi_R|=f(P_{dc})$, оптимізованої за критерієм

МТРА, дає змогу збільшити $\cos\varphi$ асинхронного електропривода на 14 % у порівнянні з класичною стратегією керування *IFOC*, при роботі із зниженою потужністю, що є типовим режимом на рухомому складі з автономним джерелом живлення.

Список використаних джерел

1. Панкратов В. В., Зима Е. А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 120 с.
2. Peresada S., Kovbasa S., Dymko S., Bozhko S. Maximum Torque-per-Amp Tracking Control of Saturated Induction Motors. *International Conference on MODERN ELECTRICAL AND ENERGY SYSTEMS Kremenchuk*, 2017. P. 72–75. URL: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248955>.
3. Цветков П. Е. Разработка и исследование систем асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением для насосных механизмов: дис... канд. техн. наук. Липецк, 2014. 163 с.
4. Виноградов А. Б., Изосимов Д. Б., Флоренцев С. Н., Глебов Н. А. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров. *Электротехника*. 2010. № 12. С. 12-19.

5. Електропривод змінного струму: Пат. № 118307 Україна, № а201705189. МПК Н 02 Р 21/02; заявл. 29.05.2017; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 10 с.

6. Shkurpela O. O., Yatsko S. I. Control system asynchronous electric traction drive. *Metallurgical and Mining Industry*, 2017. № 6. P. 14-19. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/MMI-2017-No6>.

7. Яровий Г. І., Ніконенко Д. В., Тукалов І. О., Шкурпела О. О. Побудова математичної моделі електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2013. № 136. С. 152-162.

Тугай Дмитро Васильович, доктор технічних наук, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки ХНУМГ імені О. М. Бекетова.

Шкурпела Олександр Олександрович, старший лаборант кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки ХНУМГ імені О. М. Бекетова Тел.: +38(097)948-99-45. E-mail: 447Alexashka@gmail.com.

Tugay Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Alternative Energy and Electrical Engineering, O.M. Beketov National University of Urban Economy.

Shkurpela Olexandr., Senior Lab Technician, Department of Alternative Energy and Electrical Engineering, O.M. Beketov National University of Urban Economy. Phone: +38(097)948-99-45. E-mail: 447Alexashka@gmail.com.

Статтю прийнято 22.02.2019 р.