



УДК 621.313.3

DOI: 10.31388/2220-8674-2020-2-27

## ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ПРИКЛАДENOЮ НАПРУГОЮ

Вовк О. Ю., к. т. н.

ORCID:0000-0003-0154-6972

Квітка С. О., к.т.н.

ORCID:0000-0001-9234-9274

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
імені Дмитра Моторного*

e-mail: [oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua](mailto:oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua)

*Постановка проблеми.* Електромеханічне перетворення енергії у багатьох виробничих і побутових процесах здійснюється за допомогою електроприводу, на частку якого в різних країнах Європи припадає споживання від 50% до 70% всієї виробленої електричної енергії [1–4]. Більшу частину всіх електроприводів складають електроприводи змінного струму, доля яких становить за різними даними від 68% до 85% від загальної кількості електроприводів (головним чином, це асинхронні електроприводи) [5, 6].

Значний час роботи асинхронні електродвигуни, які є силовими приводними агрегатами асинхронних електроприводів, функціонують з не оптимальним завантаженням, що обумовлює зменшення їх коефіцієнта корисної дії у порівнянні з максимальним значенням. У різних провідних країнах кількість асинхронних електроприводів коливається від 80% до 90% [7]. Використання пристроїв для регулювання роботи асинхронних електродвигунів дозволить економити до 40 – 50% споживаної ними електроенергії [8, 9], а економія 1 кВт споживаної потужності обходиться в 4–5 разів дешевше вартості 1 кВт потужності нової енергогенеруючої установки, яка вводиться у дію [5]. Тому заощадження електроенергії при роботі трифазних асинхронних електродвигунів приводу робочих машин поточкових технологічних ліній є актуальною народно-господарською проблемою, вирішенню якої присвячено багато науково-практичних робіт.

*Аналіз останніх досліджень.* На сучасному етапі для вирішення зазначеної проблеми в усьому світі використовуються регульовані асинхронні електроприводи, які дають значний ефект як в економії електроенергії, так і в інших показниках технологічного процесу. У цьому напрямку працюють багато вчених, серед яких Барський В.А., Бешта А.С., Горбачев Н.В., S. Mirchevski, S. Hussein, H. Gavrilă, Гуляев І.В., Тугаев Г.М., Борисевич А.В., Козарук А.Е., Васильев В.Ю.,

Ушшаков А.С., Колганов А.Р., Назипова Л.Р., М. Jannati, SA. Anbaran, G. Kohlrusz, D. Fodor і багато інших, якими було досліджено різні аспекти енергозберігаючого керування асинхронних електродвигунів. У всіх запропонованих системах автоматичного керування електроприводами є свої переваги і недоліки, які докладно описані в [10–15]. Крім перерахованого в зазначених літературних джерелах, регульований асинхронний привід має ще один недолік – всі існуючі алгоритми його функціонування і засоби для їх реалізації не враховують конструктивні і режимні особливості робочої машини, яка приводиться в дію асинхронним електродвигуном приводу.

*Формулювання цілей статті.* Одними з характеристик робочих машин, що відображають ці особливості, є їх механічні характеристики, які мають характерний вид для певних типів робочих машин. Тому в статті пропонується здійснювати керування асинхронним електродвигуном приводу робочих машин з урахуванням виду їх механічних характеристик по мінімуму втрат активної потужності в електродвигуні за допомогою прикладеної напруги з урахуванням завантаження електродвигуна. Метою статті є встановлення залежності між напругою на затискачах електродвигуна і коефіцієнтом його навантаження з урахуванням виду механічної характеристики робочої машини при мінімумі втрат активної потужності в електродвигуні.

*Основна частина.* З метою встановлення залежності між втратами активної потужності в асинхронному електродвигуні, прикладеною напругою, навантаженням асинхронного електродвигуна і коефіцієнтом, що характеризує вид механічної характеристики робочої машини, розглянемо процес електромеханічного перетворення енергії в електродвигуні, використовуючи його Г-подібну схему заміщення (рис.1).

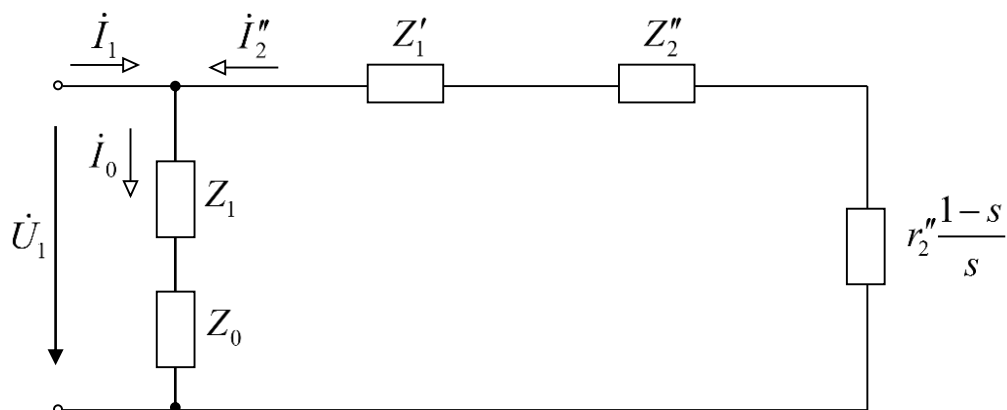


Рис. 1. Г-подібна схема заміщення фази асинхронного електродвигуна [16]



На схемі (рис.1) позначено:  $\dot{U}_1$  – комплекс діючого значення напруги, прикладеної до фази електродвигуна;  $\dot{I}_1$  – комплекс діючого значення сили струму у фазі електродвигуна;  $\dot{I}_2''$  – комплекс діючого значення сили струму навантажувальної вітки;  $\dot{I}_0$  – комплекс діючого значення сили струму вітки намагнічування;  $s$  – ковзання електродвигуна;  $Z_1, Z_0, Z_1', Z_2''$  – комплекси повних опорів віток схеми.

Комплекси повних опорів віток схеми дорівнюють:

$$Z_1 = r_1 + jx_1; \quad (1)$$

$$Z_0 = r_0 + jx_0; \quad (2)$$

$$Z_1' = r_1' + jx_1'; \quad (3)$$

$$Z_2'' = r_2'' + jx_2'', \quad (4)$$

де  $r_1', x_1', r_2'', x_2'', r_1, x_1, r_0, x_0$  – параметри Г-подібної схеми заміщення, Ом.

Запишемо рівняння втрат в асинхронному електродвигуні, застосовуючи схему заміщення на рис. 1. Постійні втрати потужності виникають у вітці намагнічування схеми, тому вони дорівнюють:

$$\Delta P_{const} = 3 \cdot r_1 \cdot I_0^2 + 3 \cdot r_0 \cdot I_0^2. \quad (5)$$

Через те, що

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_0)^2 + (x_1 + x_0)^2}}, \quad (6)$$

отримаємо:

$$\Delta P_{const} = \frac{3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot U_1^2}{(r_1 + r_0)^2 + (x_1 + x_0)^2}. \quad (7)$$

За умови дії на затискачах електродвигуна номінальної напруги (тобто  $U_1 = U_{1н}$ ) рівняння (7) прийме вигляд:



$$\Delta P_{const.H} = \frac{3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot U_{1H}^2}{(r_1 + r_0)^2 + (x_1 + x_0)^2}. \quad (8)$$

Розділивши (7) на (8) отримаємо:

$$\Delta P_{const} = \Delta P_{const.H} \cdot \left( \frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2. \quad (9)$$

Увівши позначення:

$$k_u = \frac{U_1}{U_{1n}}, \quad (10)$$

де  $k_u$  – коефіцієнт відхилення напруги,  
отримаємо:

$$\Delta P_{const} = \Delta P_{const.n} \cdot k_u^2. \quad (11)$$

Змінні втрати потужності виникають у навантажувальній вітці схеми, тому вони дорівнюють:

$$\Delta P_{var} = 3 \cdot r_1' \cdot (I_2'')^2 + 3 \cdot r_2'' \cdot (I_2'')^2. \quad (12)$$

Через те, що

$$I_2'' = \frac{U_1}{\sqrt{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1-s}{s} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}, \quad (13)$$

отримаємо:

$$\Delta P_{var} = \frac{3 \cdot (r_1' + r_2'') \cdot U_1^2}{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1-s}{s} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}. \quad (14)$$



За умови дії на затискачах електродвигуна номінальної напруги та за умови номінального навантаження (тобто  $s = s_H$ ) рівняння (14) прийме вигляд:

$$\Delta P_{var.H} = \frac{3 \cdot (r_1' + r_2'') \cdot U_{1H}^2}{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1 - s_H}{s_H} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}. \quad (15)$$

Розділивши (14) на (15) отримаємо:

$$\Delta P_{var} = \Delta P_{var.H} \cdot \frac{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1 - s_H}{s_H} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1 - s}{s} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \cdot \left( \frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2. \quad (16)$$

З урахуванням (10) рівняння (16) буде мати вигляд:

$$\Delta P_{var} = \Delta P_{var.H} \cdot \frac{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1 - s_H}{s_H} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1 - s}{s} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \cdot k_u^2. \quad (17)$$

Якщо додати (11) до (17), то отримаємо сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{const.n} \cdot k_u^2 + \Delta P_{var.H} \cdot \frac{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1 - s_H}{s_H} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}{\left( r_1' + r_2'' + r_2'' \cdot \frac{1 - s}{s} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \cdot k_u^2. \quad (18)$$

Після перетворень (18) можна записати у такому вигляді:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{const.n} \cdot k_u^2 + \Delta P_{var.n} \cdot \frac{\left(r_1' + \frac{r_2''}{s_H}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}{\left(r_1' + \frac{r_2''}{s}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \cdot k_u^2. \quad (19)$$

Уведемо позначення:

$$z_H = \left(r_1' + \frac{r_2''}{s_H}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2, \quad (20)$$

де  $z_H$  – повний опір навантажувальної вітки Г-подібної схеми заміщення в номінальному режимі роботи, Ом,  
і перепишемо (19) у наступному вигляді:

$$\Delta P_{\Sigma} = \left( \Delta P_{const.n} + \Delta P_{var.n} \cdot \frac{z_H}{\left(r_1' + \frac{r_2''}{s}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \right) \cdot k_u^2. \quad (21)$$

У [17–20] досліджено, як залежить ковзання асинхронного електродвигуна від прикладеної напруги, навантаження і виду механічної характеристики робочої машини. Тому вираз (21) для електродвигуна приводу робочої машини з незалежною від швидкості механічною характеристикою з урахуванням [17–20] буде мати вигляд:

$$\Delta P_{\Sigma} = \left( \Delta P_{const.H} + \Delta P_{var.H} \cdot \frac{z_H}{\left(r_1' + \frac{r_2'' \cdot k_u^2}{s_H \cdot k_3}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \right) \cdot k_u^2. \quad (22)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт завантаження асинхронного електродвигуна, який дорівнює відношенню поточного моменту на валу електродвигуна до номінального.

Для електродвигуна приводу робочої машини з лінійно зростаючою механічною характеристикою вираз (21) буде мати вигляд:



$$\Delta P = \left( \Delta P_{const.H} + \Delta P_{var.H} \cdot \frac{z_H}{\left( r_1' + \frac{r_2'' \cdot \left( \frac{k_u^2}{k_l \cdot s_n} + \frac{1 - M_*}{1 - s_n} \right)}{M_* + \frac{1 - M_*}{1 - s_n}} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \right) \cdot k_u^2. \quad (23)$$

где  $M_*$  – відносне значення моменту зрушення робочої машини.

Для електродвигуна приводу робочої машини з нелінійно зростаючою механічною характеристикою вираз (21) буде мати вигляд:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{const.H} \cdot k_u^2 + \Delta P_{var.H} \times \frac{z_H \cdot k_u^2}{\left( r_1' + \frac{r_2''}{1 + \frac{(1 - s_n)}{k_3 \cdot 2s_n} \left( k_u^2 - \sqrt{k_u^4 (1 - s_n) + k_3 \cdot 4s_n (1 - M_*) (k_u^2 + k_3 \cdot s_n M_*)} \right)} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}. \quad (24)$$

Для електродвигуна приводу робочої машини з нелінійно спадаючою механічною характеристикою вираз (21) буде мати вигляд:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{const.H} \cdot k_u^2 + \Delta P_{var.H} \times \frac{z_H \cdot k_u^2}{\left( r_1' + \frac{r_2''}{\frac{1}{2} \left( \left( 1 + \frac{k_3}{k_u^2} s_n M_* \right) - \sqrt{\left( 1 - \frac{k_3}{k_u^2} s_n M_* \right)^2 - 4 \frac{k_3}{k_u^2} (1 - M_*) (1 - s_n)} \right)} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}. \quad (25)$$

Встановимо залежності коефіцієнту відхилення напруги від коефіцієнту завантаження асинхронного електродвигуна приводу робочих машин з різними видами механічних характеристик, за якої втрати активної потужності в електродвигуні будуть мінімальними, використовуючи рівняння (22) – (25).

При розкритті дужок в (22) – (25) отримаємо рівняння восьмого і вище порядків щодо  $k_u$ . Тому аналітично вивести рівняння для

розрахунку  $k_u$  в залежності від  $k_3$  не є можливим. Таку залежність можна отримати тільки чисельно для конкретного асинхронного електродвигуна, використовуючи програму, що дозволяє знаходити мінімум функції. Результати розрахунків і апроксимацій кривих для асинхронного електродвигуна АИР100S4 (номінальною потужністю 3,0 кВт) у разі приводу робочих машини з різними видами механічних характеристик показано на рис.2 – 5.

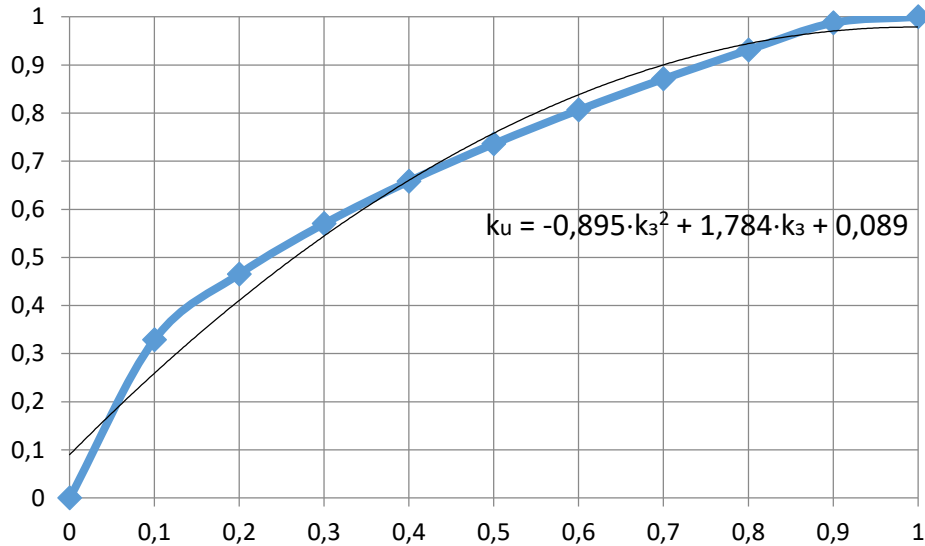


Рис. 2. Залежність  $k_u = f(k_3)$  для асинхронного електродвигуна приводу робочої машини з незалежною від швидкості механічною характеристикою

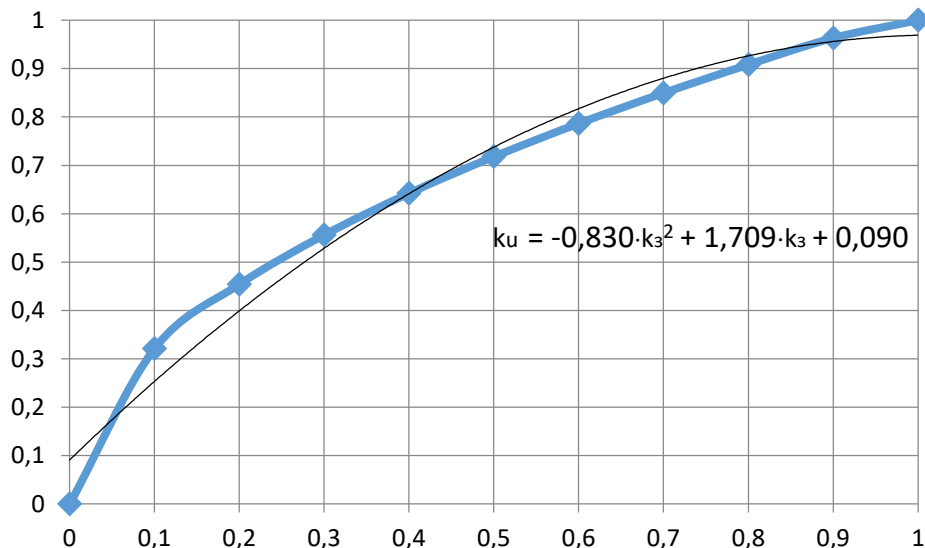


Рис. 3. Залежність  $k_u = f(k_3)$  для асинхронного електродвигуна приводу робочої машини з лінійно зростаючою механічною характеристикою



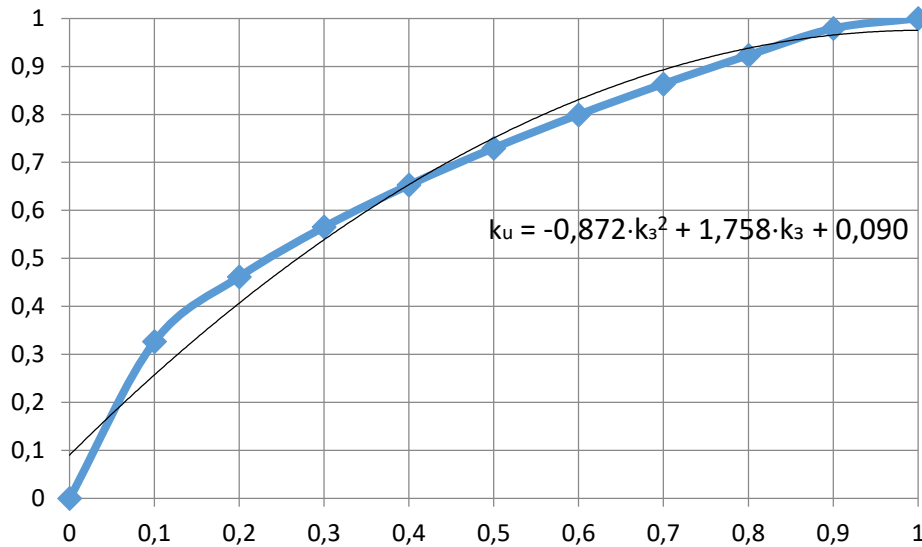


Рис. 4. Залежність  $k_u = f(k_3)$  для асинхронного електродвигуна приводу робочої машини з нелінійно зростаючою механічною характеристикою

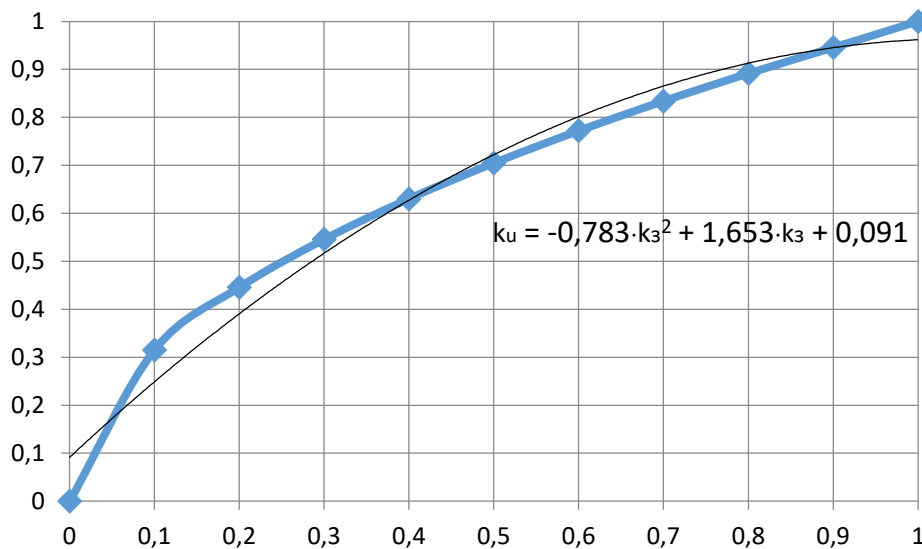


Рис. 5. Залежність  $k_u = f(k_3)$  для асинхронного електродвигуна приводу робочої машини з нелінійно спадаючою механічною характеристикою

З рівнянь на рис. 2–5 видно, що коефіцієнти в них різні, вони характеризують вид механічної характеристики робочої машини і конструктивні параметри електродвигуна. Отже, управління асинхронним електродвигуном по мінімуму втрат активної потужності за допомогою напруги, що підводиться, в залежності від його



навантаження повинне здійснюватися за попередньо отриманими залежностями  $k_u = f(k_3)$ , які враховують конструктивні параметри електродвигуна і вид механічної характеристики робочої машини. Розрахунок треба здійснювати в програмі, що дозволяє знаходити мінімум функції, задаючись завантаженням електродвигуна і використовуючи вирази (22)–(25). Після розрахунку отримані залежності апроксимують і отримують рівняння для управління електродвигуном.

*Висновки.* Таким чином, керування асинхронними електродвигунами приводів робочих машин з різними видами механічних характеристик за допомогою прикладеної напруги повинно здійснюватись за попередньо чисельно визначеними залежностями коефіцієнту відхилення напруги від коефіцієнту завантаження конкретного електродвигуна із умови мінімуму втрат в електродвигуні.

Список використаних джерел:

1. Барский В.А., Бешта А.С., Горбачев Н.В., Загирняк М.В. и др. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* № 9 (115). 2013. С. 2-11.
2. S. Mirchevski, M. Bartłomiejczyk, Š. Hamacek, H. Hamacková. Analysis of energy efficiency in electric drives // *Result and solutions of young r & s for innovations and progress.* 2013. pp.5-9.
3. Hussein S. Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor Drive // *Energy and Power Engineering.* no.3. 2011. pp. 107-112.
4. V. Manescu (Paltanea), G. Paltanea, G. Scutaru, I. Peter. New Trends in Energy Efficient Electrical Machines // *Procedia Engineering.* No.181. 2017. pp. 568-574.
5. Mirchevski S. Energy Efficiency in Electric Drives // *Electronics.* vol. 16, no.1, june, 2012. pp. 46-49.
6. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя: монография. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. 200 с.
7. Борисевич А.В. Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями: обзор состояния и новые результаты: монография. М.: ИНФРА-М, 2015. 102 с.
8. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency & Renewable Energy. Building Technologies Office. Energy Savings Potential and Opportunities for High-Efficiency *Electric Motors in Residential and Commercial Equipment.* December, 2013. 80 p.



9. Energy Efficiency with Electric Drive Systems / ZVEI - German Electrical and Electronic // *Responsible: Gunther Koschnick, Bernhard Sattler*. April, 2015. 30 p.

10. Kozyaruk A.E., Vasiliev B.Yu. Methods and tools increasing energy efficiency of machines and technologies with asynchronous drives // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015. vol. 15., no. 1, pp. 47-53.

11. Ушаков А.С., Колганов А.Р. Исследование современных методов энергосберегающего управления асинхронным электроприводом // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*, 2012. Вып.2. С. 1-8.

12. Назипова Л.Р. Недостатки применения частотного управления на типовых асинхронных электродвигателях // *Наука, образование, общество: материалы VI Международной научно-практической конференции*. В 2 т., Т.1. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. С. 326-329.

13. M. Jannati, SA. Anbaran, SH. Asgari, WY. Goh and others. A review on Variable Speed Control techniques for efficient control of Single-Phase Induction Motors: Evolution, classification, comparison // *Renewable & sustainable energy reviews*, 2017. vol.75. pp. 1306-1319.

14. G. Kohlrusz, D. Fodor. Comparison of scalar and vector control strategies of induction motors // *Hungarian journal of industrial chemistry veszprém*, 2011. vol. 39(2). pp. 265-270.

15. Kostić M. Analysis of Induction Motor Efficiency Class Change at Partial Load // *Elec. Energ.* vol. 23, no.3. December 2010. pp. 333-344.

16. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко Я.С. Проектирование электрических машин / Под ред. О. Д. Гольдберга. М.: Высшая школа, 2001. 430с.

17. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Квітка О.С. Вплив відхилення напруги живлячої мережі на втрати потужності в асинхронному електродвигуні // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 164. С. 121-123.

18. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Квітка О.С. Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні // *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип.7, т.1. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. С. 126 – 134.

19. Вовк О.Ю. Квітка С.О., Квітка О.С. Вплив зниження напруги живлячої мережі на теплове зношення ізоляції асинхронного електродвигуна // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Вип. 153 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. Харків: ХНТУСГ, 2014. С. 79-81.



20. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Дідур В.А. Вплив відхилення живлячої напруги на ресурс ізоляції асинхронних електродвигунів поточкових технологічних ліній // *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2019 Вип. 9., Т.2. DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-25

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ  
ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ПРИКЛАДENOЮ НАПРУГОЮ  
Вовк О.Ю., Квітка С.О.**

*Анотація*

У статті розглянуто один із шляхів вирішення народно-господарської проблеми заощадження електроенергії при роботі асинхронних електродвигунів, що застосовуються для приводу робочих машин поточкових технологічних ліній. Показано, що всі існуючі системи енергоефективного керування асинхронними електроприводами не враховують види механічних характеристик робочих машин. Проаналізовано з точки зору енергозбереження процес електромеханічного перетворення енергії асинхронних електродвигунів. Отримано залежності живлячої напруги від завантаження асинхронних електродвигунів приводу робочих машин з різними видами механічних характеристик, які дозволяють здійснювати управління асинхронними електроприводами за допомогою прикладеної напруги з урахуванням мінімуму втрат активної потужності в електродвигуні. Наведено результати аналітичних досліджень.

**Ключові слова:** асинхронний електродвигун, втрати потужності, робоча машина, навантаження, енергозбереження, керування, механічна характеристика.

**ЕНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМИ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПРИЛОЖЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ  
Вовк А.Ю., Квитка С.А.**

*Аннотация*

В статье рассмотрен один из путей решения народно-хозяйственной проблемы энергосбережения при работе асинхронных электродвигателей, применяемых для привода рабочих машин поточных технологических линий. Показано, что все существующие системы энергоэффективного управления асинхронными электроприводами не учитывают виды механических характеристик рабочих машин. Проанализированы с точки зрения энергосбережения процесс электромеханического преобразования энергии асинхронных электродвигателей. Получены зависимости питающего напряжения от загрузки асинхронных электродвигателей привода рабочих машин с различными видами механических характеристик, которые позволяют осуществлять управление асинхронными электроприводами с помощью приложенного напряжения с учетом минимума потерь активной мощности в электродвигателе. Приведены результаты аналитических исследований.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, потери мощности, рабочая машина, нагрузка, энергосбережение, управление, механическая характеристика.



## ENERGY SAVING CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS WITH APPLIED VOLTAGE

O. Vovk, S. Kvitka

### *Summary*

The article discusses one of the ways to solve the national economic problem of energy saving during the operation of three-phase asynchronous electric motors used to drive working machines of production lines. The existing systems of energy efficient control of asynchronous electric drives are considered and it is shown that all of them do not take into account the types of mechanical characteristics of working machines. This fact is reflected in the accuracy of electric motor control to minimize electricity consumption. Using the L-shaped equivalent circuit, the process of electromechanical energy conversion in asynchronous electric motors used to drive working machines with various types of mechanical characteristics that operate under load conditions is analyzed from the point of view of energy saving. As a result of the analysis, equations were obtained for the total losses of active power in an asynchronous electric motor, depending on the coefficient of deviation of the applied voltage, load factor, design parameters of the electric motor and the type of mechanical characteristics of the working machine. The dependences of the voltage deviation coefficient on the load coefficient of asynchronous electric motors of the drive of working machines with various types of mechanical characteristics are obtained. By approximating these dependencies, equations are obtained that make it possible to control asynchronous electric drives using the applied voltage, taking into account the minimum active power losses in the electric motor. A technique has been developed for energy-saving control of asynchronous electric motors using an applied voltage. The results of analytical studies are presented. The obtained equations can be used in the design of energy-saving control devices.

**Key words:** asynchronous motor, power loss, equivalent circuit, work machine, load, energy saving, control, mechanical characteristic, slip.