

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОНАСОСНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ANSYS MAXWELL RMXPRТ

Проведено дослідження робочих характеристик асинхронного двигуна електронасосного агрегату для електротехнологій. Із використанням програмного забезпечення Ansys Maxwell Rmxprt встановлено вплив геометрії статора і ротора, типу матеріалу та обмоток на робочі характеристики електродвигуна потужністю 15 кВт. Проаналізовано характер зміни механічних характеристик і ККД електродвигуна при варіаціях частоти від 50 до 400 Гц.

Ключові слова: електродвигун, електронасосний агрегат, електротехнології, робочі характеристики, частотне керування.

Проведено исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя електронасосного агрегата для електротехнологій. С использованием программного обеспечения Ansys Maxwell Rmxprt установлено влияние геометрии статора и ротора, типа материала и обмоток на рабочие характеристики электродвигателя мощностью 15 кВт. Проанализирован характер изменения механических характеристик и КПД электродвигателя при вариациях частоты от 50 до 400 Гц.

Ключевые слова: электродвигатель, електронасосный агрегат, електротехнологии, рабочие характеристики, частотное управление.

Operating characteristics of asynchronous motor of pump unit for electrotechnologies are researched. With using Ansys Maxwell Rmxprt the influence of the geometry of the stator and rotor, type of winding and material on the 15 kW electric motor operating characteristics are identified. Changes in the mechanical characteristics and the efficiency of the electric motor with variation of frequency from 50 to 400 Hz are analyzed.

Key words: electric motor, electric drive pump unit, electrotechnologies, operating characteristics, frequency regulation.

Постановка проблеми. Як відомо, фізичне моделювання є одним із найскладніших типів моделювання з точки зору його реалізації через великі витрати на проведення натурних експериментів. Саме тому на етапі проектування привідних електродвигунів електронасосних агрегатів для електротехнологій широко використовуються математичне та імітаційне моделювання. Вони програмно реалізовані в основних системах автоматизованого проектування типу CAD, САМ та інших, які є досить зручними для користувача-проектанта.

Проте, досі існує проблема сумісності між різними типами систем автоматизованого проектування. Наприклад, іноді неможливо імпортувати заздалегідь створену для подальшого дослідження

геометричну модель. Цю проблему можна вирішити застосуванням під час проектування «міждисциплінарних» систем автоматизованого проектування. Однією з найвідоміших і авторитетних подібних систем, що добре себе зарекомендувала, є Ansys.

Ansys Maxwell – програма комплексного моделювання електромагнітного поля при розробці та аналізі 3D/2D-систем, таких як двигуни, приводи, трансформатори та інші електричні та електро-механічні пристрої, що використовуються в різних галузях промисловості та сільського господарства.

Ansys Maxwell Rmxprt – програмний модуль, призначений для розробки та оптимізації обертових електричних механізмів. Rmxprt надає користувачеві машинно-орієнтовані інтерфейси на

основі шаблонів для роботи з асинхронними, синхронними, безщітковими і щітковими механізмами.

Для виконання класичних розрахунків продуктивності двигуна RMXprt може автоматично створювати 3D і 2D геометрію, призначати властивості матеріалів і встановлювати значення інших параметрів, необхідних для виконання ретельного звичайно-елементного аналізу з використанням Ansys Maxwell.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Підвищення енергоефективності роботи електронасосних агрегатів для електротехнологій може бути досягнуто шляхом спрямування досліджень у двох основних напрямках.

Перший напрям [1-5; 7-9] полягає в удосконаленні систем керування та використанні сучасних засобів автоматизації електронасосних агрегатів для електротехнологій, що забезпечують ефективніше споживання електроенергії.

Другий напрям [6; 8] полягає в зменшенні втрат потужностей на тертя в електронасосних агрегатах для електротехнологій, а отже, в підвищенні загального ККД цих машин.

Обидва розглянуті напрями залишаються актуальними для подальших досліджень.

У цій роботі висвітлюються результати досліджень за першим напрямом.

Формулювання мети статті. Метою статті є дослідження робочих характеристик спроектованого асинхронного двигуна електронасосного агрегату для електротехнологій з використанням програмного модуля Ansys Maxwell RMXprt та виявлення інтерактивного впливу зміни його технічних параметрів на основні робочі характеристики.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математичну модель асинхронної машини з короткозамкненим ротором можна отримати з узагальненої математичної моделі електричної машини [2], якщо обмотки ротора замкнуті накороток. При цьому в загальних рівняннях слід прийняти $\bar{u}_R = 0$.

$$\begin{cases} \bar{u}_S = r_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_S, \\ 0 = r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - \rho v) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_S = x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R = x_m \bar{i}_S + x_R \bar{i}_R, \\ m = k \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\ \bar{T}_m - \frac{dv}{dt} = m - m_f. \end{cases} \quad (1)$$

Для динамічних систем необхідно враховувати перехідні електромагнітні процеси в машині [2; 8]. У цьому випадку як пару змінних, що описують машину, залишимо просторові вектори статора і потокозчеплення ротора $(\bar{i}_S, \bar{\psi}_R)$, тоді рівняння (1) приймуть вигляд:

$$\bar{u}_S = r_S \bar{i}_S + x'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\alpha_k x'_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \bar{\psi}_R + jk_R \rho v \bar{\psi}_R, \quad (2)$$

$$0 = -k_R r_R \bar{i}_S + \frac{1}{\bar{T}_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - \rho v) \bar{\psi}_R, \quad (3)$$

$$m = k_R \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S), \quad (4)$$

$$\bar{T}_m \frac{dv}{dt} = m - m_f, \quad (5)$$

де $r = (r_S + k_R^2 r_R)$, $x'_S = \left(x_S - \frac{x_m^2}{x_R} \right)$, $k_R = \frac{x_m}{x_R}$,

$\bar{T}_R = \frac{x_R}{r_R}$ – безрозмірні коефіцієнти.

Для того щоб краще зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються в асинхронній машині з короткозамкненим ротором, її досліджують у різних системах координат. Для представлення просторових векторів використовується комплексна площина. Рівняння (1)-(5) використовуються при програмуванні для дослідження робочих характеристик асинхронних двигунів електронасосних агрегатів для електротехнологій.

Програмний модуль Ansys Maxwell RMXprt використовує аналітичні рівняння і призначений для розробки та оптимізації обертових механізмів різного типу (рис. 1). У тому числі, він являє собою зручний інструмент для дослідження індукційних механізмів, які нині є найпоширенішими приводами електронасосних агрегатів для електротехнологій.

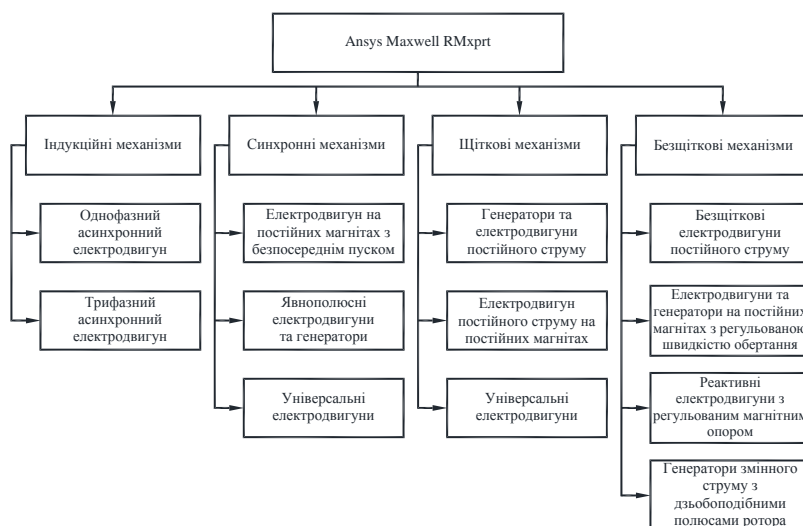


Рис. 1. Розробка та оптимізація обертових механізмів різного типу в програмному модулі Ansys Maxwell RMXprt

Проведемо аналіз асинхронного електродвигуна електронасосного агрегату для електротехнологій у програмному забезпеченні Ansys Maxwell. Для цього його слід запустити та обрати модуль RMXprt. У цьому модулі відбуваються всі налаштування та введення числових значень параметрів електричної машини.

Програмний інтерфейс Ansys Maxwell RMXprt зображений на рис. 2, він містить п'ять основних вікон: Project Manager, Properties, Message Manager, Progress та найбільше графічне вікно, яке розташоване праворуч.

У програмному вікні Project Manager слід ввести параметри статора, ротора та загальні параметри асинхронного електродвигуна. Зокрема, для статора та ротора зазначаються їхні геометричні розміри, тип обмотки, тип матеріалу. Перед

запуском програмного аналізу електродвигуна, слід ввести загальні його параметри, наприклад потужність, напруга, робоча температура, кількість полюсів, номінальна швидкість, втрати потужності.

Розрахунок проводився для асинхронного двигуна потужністю 15 кВт, номінальною швидкістю обертання 1460 об/хв, напругою 380 В при зовнішньому і внутрішньому діаметрах статора відповідно 327 мм і 210 мм та при зовнішньому і внутрішньому діаметрах ротора відповідно 209,2 мм і 75 мм. Довжина статора і ротора однакові (280 мм). Кількість пазів статора і ротора відповідно становлять 72 і 58. Як матеріали використано такі налаштування: для статора – тип сталі 2, для ротора – тип сталі M19_24G, для обмоток – cast_aluminium_75C.

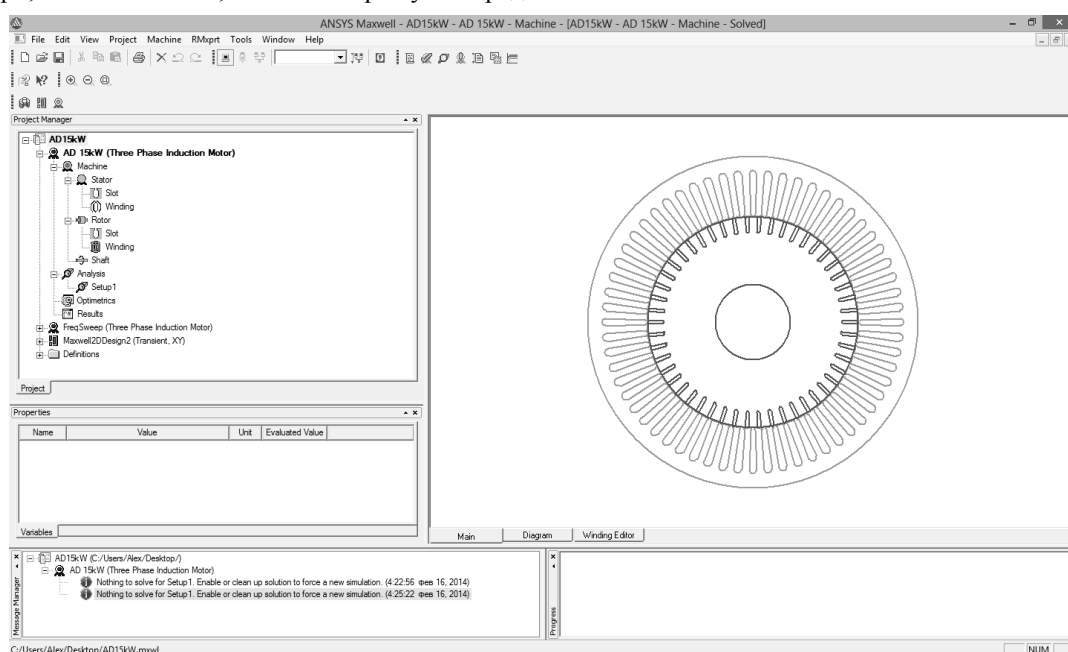


Рис. 2. Інтерфейс програмного модуля Ansys Maxwell RMXprt

Результати моделювання робочих характеристик спроектованого асинхронного двигуна електро-

насосного агрегату для електротехнологій показані у вигляді ілюстрацій на рис. 3-5.

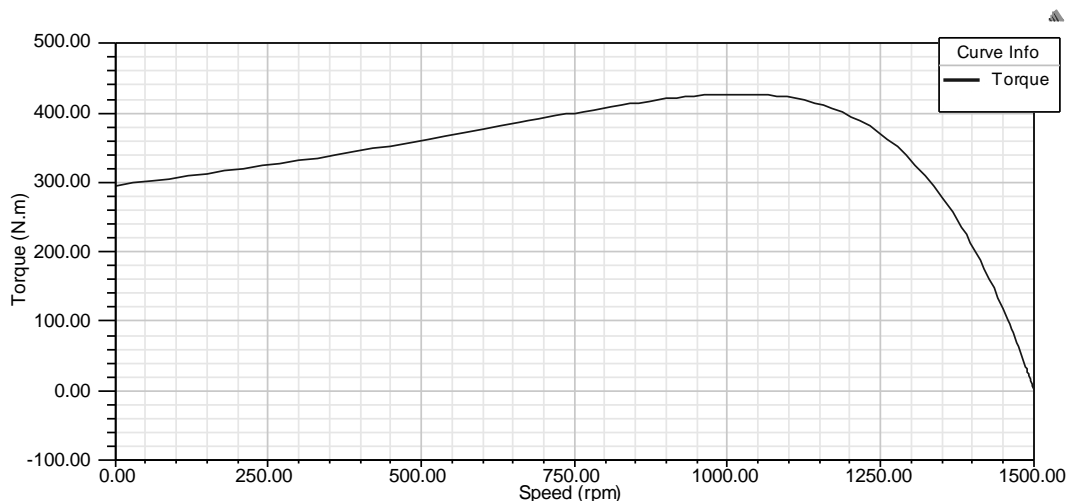


Рис. 3. Залежність $\dot{I} = f(n)$ моменту \dot{I} (Н·м) електродвигуна від швидкості обертання ротора n (об/хв)

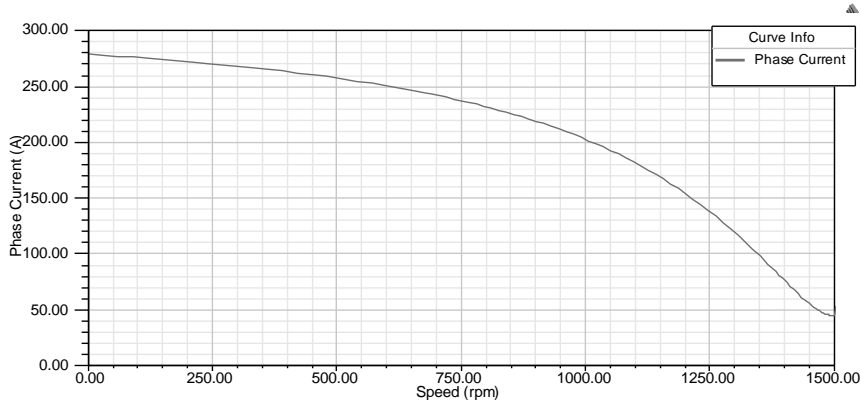


Рис. 4. Залежність $I = f(n)$ фазного струму I (А) електродвигуна від швидкості обертання ротора n (об/хв)

Найбільшого значення крива моменту $\dot{I} = f(n)$ досягає при значенні близько 1000 об/хв, якому відповідає приблизне значення моменту 425 Н·м (рис. 3). При номінальній швидкості двигуна в

1460 об/хв номінальний момент становить приблизно 80 Н·м.

Залежність $I = f(n)$ показує (рис. 4), що при номінальній швидкості обертання 1460 об/хв фазний струм перевищує значення 50 А.

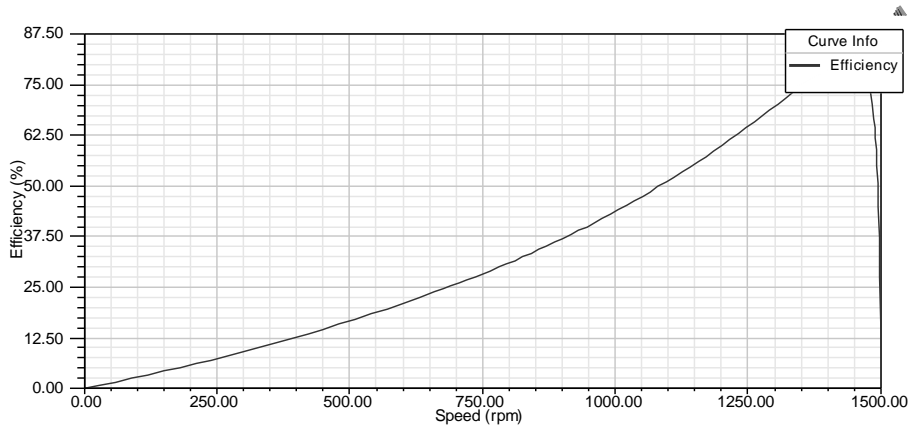


Рис. 5. Залежність $\eta = f(n)$ ККД η (%) електродвигуна від швидкості обертання ротора n (об/хв)

ККД спроектованого асинхронного двигуна не перевищує значення 87,5 % та є найбільшим у діапазоні швидкостей 1300...1475 об/хв (рис. 5).

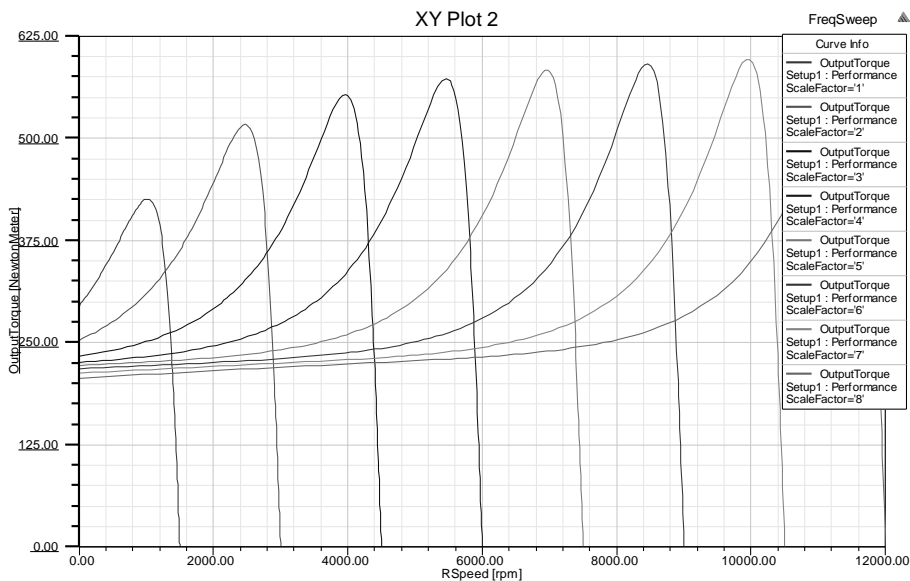


Рис. 6. Сімейство кривих залежності $\dot{I} = f(n)$ моменту \dot{I} (Н·м) електродвигуна від швидкості обертання ротора n (об/хв) при варіаціях частоти $f = 50, 100..400$ Гц

У програмі Ansys Maxwell RMxprt є можливість проведення параметричного аналізу. При варіаціях частоти від 50 до 400 Гц з кроком 50 Гц з одночасним збільшенням напруги живлення U в програмному модулі Ansys Maxwell RMxprt побудовані сімейства кривих для моменту I та для ККД η спроектованого двигуна

електронасосного агрегату для електротехнологій (рис. 6-7).

Із сімейства кривих для ККД η (рис. 7) можна побачити, що при значенні швидкості обертання ротора близько 1200 об/хв ККД двигуна при різній частоті f різний, причому зі збільшенням частоти f він зменшується.

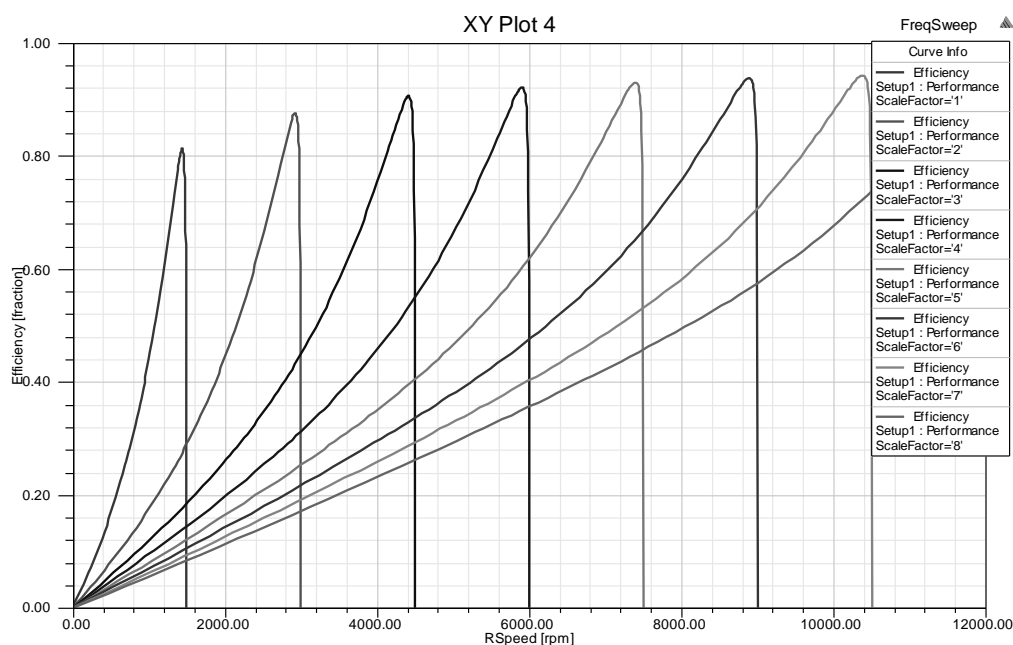


Рис. 7. Сімейство кривих залежності $\eta = f(n)$ ККД η (%) електродвигуна від швидкості обертання ротора n (об/хв) при варіаціях частоти $f = 50, 100..400$ Гц

Таким чином, у програмному модулі Ansys Maxwell RMxprt спроектований асинхронний електродвигун електронасосного агрегату для електротехнологій потужністю 15 кВт з номінальною частотою 1460 об/хв. Побудовані та проаналізовані його основні робочі характеристики, а саме залежності моменту двигуна M , фазного струму I та ККД η від швидкості обертання ротора n . Проведений параметричний аналіз для моменту M та ККД η двигуна при варіаціях частоти в діапазоні від 50 до 400 Гц.

Висновки

1. Із використанням програмного модуля Ansys Maxwell RMxprt спроектовано асинхронний

електродвигун електронасосного агрегату для електротехнологій потужністю 15 кВт із номінальною частотою 1460 об/хв.

2. Побудовані та проаналізовані основні робочі характеристики спроектованого двигуна електронасосного агрегату для електротехнологій, а саме залежності моменту двигуна M , фазного струму I та ККД η від швидкості обертання ротора n . Проведений параметричний аналіз для моменту M та ККД η двигуна при варіаціях частоти в діапазоні від 50 до 400 Гц.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бугрім Л. І. Підвищення ефективності електропривода стенда для налагодження паливорегулюючої апаратури / Л. І. Бугрім, І. С. Білюк, О. С. Кириченко // Вісник аграрної науки Причорномор'я : науково-теоретичний фаховий журнал. – Миколаїв, 2013. – Вип. 3 (73). – С. 192–199.
2. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : Корона-Век, 2008. – 368 с.
3. Кириченко О. С. Аналіз систем частотного керування електроприводів для електротехнологій / О. С. Кириченко // Наукові праці : науково-методичний журнал. – Вип. 217. Т. 229. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2013. – С. 44–50.
4. Кириченко О. С. Дискретизація безперервних систем автоматичного керування за методом Ейлера / О. С. Кириченко // Вісник аграрної науки Причорномор'я : науково-теоретичний фаховий журнал. – Миколаїв, 2013. – Вип. 1 (71). – С. 195–198.

5. Кириченко О. С. Моделювання систем автоматичного керування електроприводами за допомогою z-форм / О. С. Кириченко, І. С. Білюк, Л. І. Бугрім // Наукові праці : науково-методичний журнал. – Вип. 201, Т. 213. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2013. – С. 42–44.
6. Кириченко О. С. Підвищення енергоефективності роботи електронасосних агрегатів / О. С. Кириченко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2013. – С. 28–35.
7. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / Г. Г. Соколовский. – М. : Академия, 2006. – 265 с.
8. Терехов В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М. : Академия, 2006. – 304 с.
9. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

© Кириченко О. С., 2014

Дата надходження статті до редколегії 14.06.2014 р.

КИРИЧЕНКО Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електро-технологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету.

Коло наукових інтересів: дослідження у сфері моделювання складних технічних систем.