

О.Ф. Соколовський, зав. від.
Житомирський агротехнічний коледж

ІНТЕРАКТИВНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИМИ НАСОСНИМИ АГРЕГАТАМИ

(Представлено д.т.н., проф. Поповичем М.Г.)

Розроблено систему автоматичного керування двоагрегатною насосною установкою. Забезпечується значний рівень енергозбереження за рахунок застосування енергозберігаючого алгоритму. Впровадження контролера роботи насосів дає можливість корегувати кількість одночасно включених агрегатів.

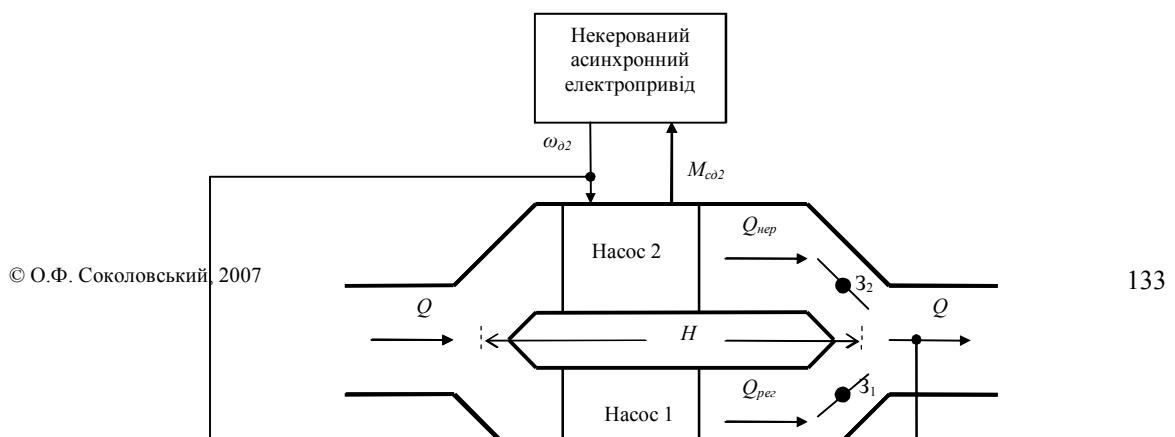
Вступ. Одним із головних завдань, що постали перед розробниками систем керування насосними установками, є мінімізація втрат електричної енергії при забезпеченні вимог технологічного процесу. Найпоширенішим та найефективнішим способом енергозбереження вважається впровадження регульованого електроприводу насосів з асинхронними двигунами, які живляться від перетворювачів частоти. Але поряд із значним розвитком в даній галузі застосування регульованого приводу на багатоагрегатних насосних установках залишається недостатньо вивченим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними напрямками впровадження перетворювачів частоти є стабілізація напорів в диктуючих точках, стабілізація рівнів в резервуарах, керування частотою обертання насоса відповідно до графіків добових потреб, екстремальні системи керування з автоматичним пошуком робочої точки насоса з максимально можливим ККД при поточних витратах. Екстремальне керування енерговитратами в асинхронному електроприводі ґрунтується на параболічному характері залежності потужності сумарних втрат енергії від напруги статора при визначених значеннях частоти та моменту опору на валі двигуна для статичного режиму [5]. Регулювання швидкості в асинхронних електроприводах з частотним та частотно-струмовим керуванням здійснюється через канал частоти. Для пошуку точки екстремуму у першому випадку використовують алгоритми з покровокою зміною амплітуди напруги, у другому – струму. При векторному керуванні швидкість регулюється зміною моментної складової вектора струму статора, а оптимізація енергетики – покровками змінами потокозчеплення ротора. Інтерактивна ЕМСАК насосними установками [4] забезпечує ефективніше енергозбереження, ніж в системах стабілізації напору, та зменшує затрати на капіталовкладення порівняно з екстремальними системами керування.

Постановка завдання. У згаданих вище дослідженнях розробники орієнтуються в основному на одноагрегатні установки. Метою даної роботи є вивчення можливостей інтерактивних систем при їх впровадженні на багатоагрегатних насосних станціях. Застосування енергозберігаючого алгоритму передбачає зменшення енергоспоживання при забезпеченні потреб споживачів.

Особливості регулювання в двоагрегатній насосній установці. При паралельній роботі двох насосних агрегатів, один з яких нерегульований, команда від системи керування на зміну частоти поступає на регульований агрегат (рис. 1). Нерегульований насос обертається з частотою $\omega_{нер}$. Насоси працюють з однаковим напором $H = H_1 = H_2$, але з різною продуктивністю. Інші робочі параметри (ККД, потужність) агрегатів теж відрізняються. Засувки $З_1$ і $З_2$ можуть перебувати лише в двох положеннях: повністю відчинено або повністю зачинено. Це дозволяє при вимиканні будь-якого турбомеханізму заблокувати прохід через інший. Енергозберігаючий алгоритм встановлює мінімально достатню частоту обертання регульованого насоса, що задовольняє потреби споживачів.

Після пуску системи режим визначається точкою A (рис. 2), насос 1 працює зі швидкістю $\omega_{рег} = \omega_1$. Через фіксований проміжок часу швидкість зменшується до значення ω_2 (точка B). Далі режим роботи системи визначається потребами споживачів. Якщо при зменшенні швидкості насоса споживачі збільшують витрати води (точка C), то швидкість регульованого насоса збільшується до значення ω_3 і робота установки переміщується в точку D (рис. 2).



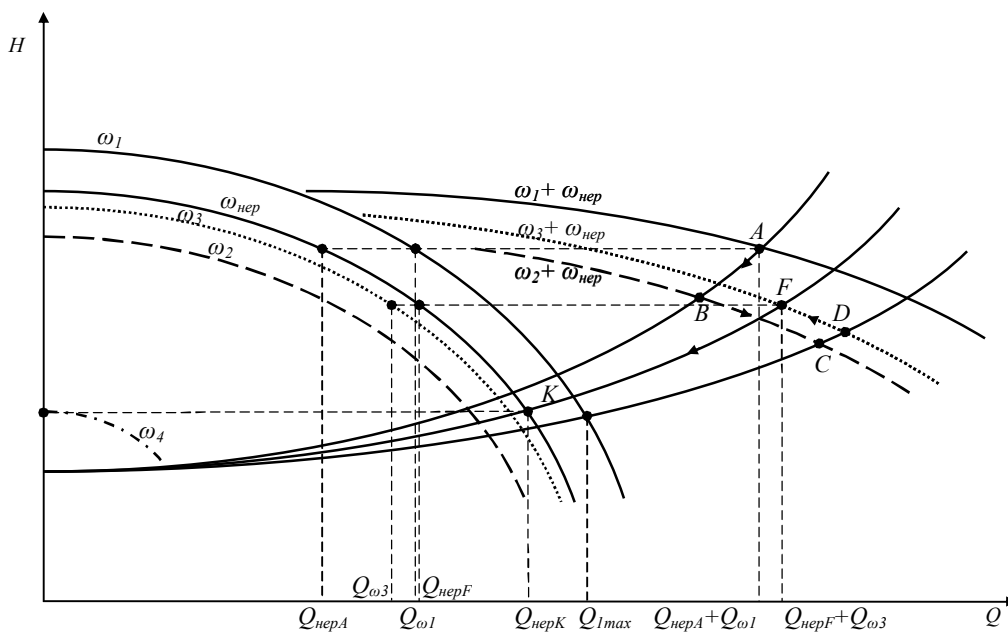
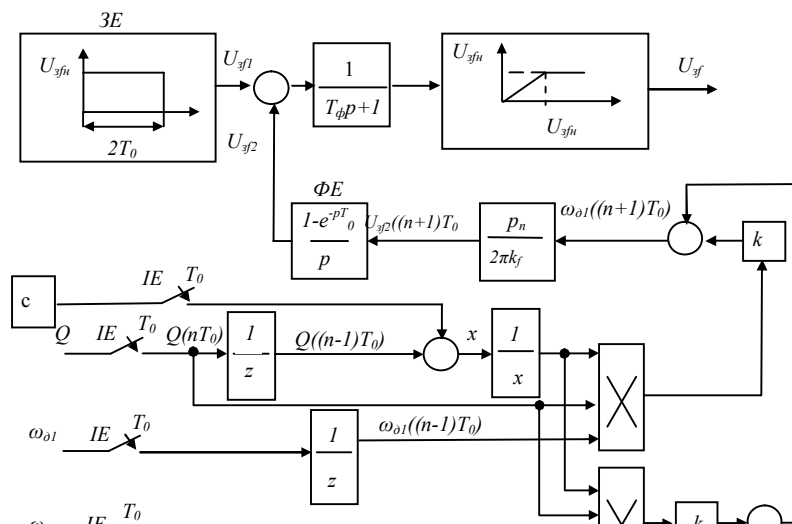


Рис. 2. Напірні характеристики при паралельній роботі насосних агрегатів
Швидкість насоса ω_3 визначається із співвідношення:

$$\omega_3 + \omega_{нер} = \frac{Q_C}{Q_B} (\omega_2 + \omega_{нер}) = \frac{Q_C}{Q_A} (\omega_1 + \omega_{нер}), \tag{1}$$

де ω_1, ω_2 – попередні швидкості регульованого насоса; $\omega_{нер}$ – швидкість нерегульованого насоса; Q_A, Q_B, Q_C – продуктивності насосної установки у відповідних точках.

Якщо споживачі не реагують на зміну швидкості насоса, то вона фіксовано зменшується. Структурна схема енергозберігаючого алгоритму зображена на рис. 3.



Задаючий елемент ZE формує напругу завдання частоти перетворювача U_{zf1} , яка відповідає номінальному значенню частоти і утримується протягом періоду часу $2T_0$. Період квантування T_0 повинен перевищувати час перехідних процесів в системі, викликаних стрибкоподібною зміною напруги завдання частоти. Інформація про продуктивність насосної установки Q та швидкості двох двигунів $\omega_{\partial 1}, \omega_{\partial 2}$ надходить в фіксовані моменти часу nT_0 за допомогою імпульсних елементів IE . Ланки $1/z$ реалізують затримку сигналів на такт квантування. Формуючий елемент ΦE перетворює дискретний сигнал в аналоговий. Через нульові початкові умови роботи системи ($Q = 0, \omega_{\partial} = 0$) напруга U_{zf2} буде дорівнювати нулю протягом $2T_0$.

Величина бажаної швидкості двигуна регульованого насоса:

$$\omega_{\partial 1}((n+1)T_0) = \omega_{\partial 1}((n-1)T_0) \frac{kQ(nT_0)}{Q((n-1)T_0) + c} + \omega_{\partial 2} \left(\frac{kQ(nT_0)}{Q((n-1)T_0) + c} - 1 \right), \quad (2)$$

де T_0 – період квантування; Q – продуктивність насосної установки; k – коефіцієнт підсилення трохи менший одиниці; c – мала стала для уникнення ділення на нуль; n – ціле додатне число; $\omega_{\partial 2}$ – швидкість двигуна нерегульованого насоса.

Коефіцієнт k необхідний для забезпечення працездатності алгоритму при відсутності реакції споживачів на зміну швидкості, тобто при $Q(nT_0) = Q((n-1)T_0)$.

Обґрунтування застосування контролера роботи насосів.

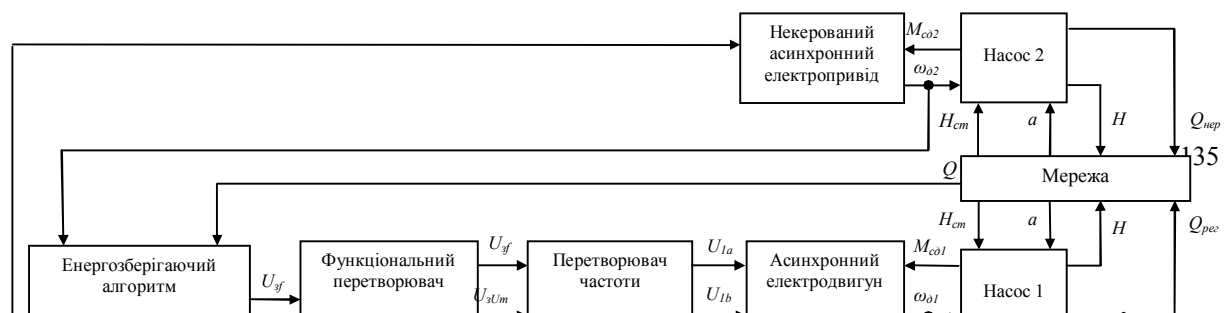
Теоретично режим роботи насосної установки може переміститися в точку K , де продуктивність регульованого насоса $Q_{рег} = 0$. При цьому нерегульований агрегат повинен вимкнутися [3]. Виконання цієї умови призведе до максимально можливої швидкості регульованого насоса на наступному періоді. При подальшому зниженні водоспоживання робота системи буде відповідати алгоритму з одноагрегатною установкою. Якщо водоспоживання збільшиться понад Q_{1max} , коли подача одного насоса не забезпечуватиме необхідного значення, нерегульований насос повинен включитися, регульований – зменшити свої оберти. Величина Q_{1max} залежить від мінімально можливого гідравлічного опору мережі.

Для забезпечення працездатності ЕМСАК в схему необхідно ввести контролер роботи насосів (рис. 4). Призначення контролера:

- здійснює вмикання насосів;
- подає команду на відключення нерегульованого насоса при $Q_{рег} = 0$;
- подає команду на включення нерегульованого насоса при збільшенні водоспоживання понад Q_{1max} .

Після пуску системи контролер відслідковує обсяг водоспоживання. Значення частоти обертання регульованого насоса при цьому визначатиметься рівнянням (2). При зменшенні водоспоживання до $Q_{рег} = 0$ контролер вимикає нерегульований агрегат. Алгоритм роботи системи буде відповідати одноагрегатній установці. При зростанні водоспоживання понад Q_{1max} контролер вмикає нерегульований агрегат. Далі в процесі регулювання в залежності від водоспоживання контролер вмикає або вимикає нерегульований агрегат.

Математична модель енергозберігаючої інтерактивної ЕМСАК багатоагрегатною насосною установкою. Структурна схема ЕМСАК подана на рис. 4.



Функціональний перетворювач ФП формує завдання амплітуди напруги U_{3Um} на основі вихідного сигналу енергозберігаючого алгоритму. Математична модель перетворювача частоти ПЧ ґрунтується на рівняннях симетричної системи напруг та перетворення 3–2. Опис асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором здійснюється за допомогою двофазової моделі в системі координат $a-b$ [6]. Математична модель некерованого асинхронного електроприводу розроблена на основі математичної моделі перетворювача напруги та двофазової моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Система рівнянь, що описує математичну модель турбомеханізму з мережею:

$$H_1 = H_2 = \frac{m}{\rho g S^2} \dot{Q} + a Q^2 + H_{cm}; \quad (3)$$

$$H_1 = H_{01} - \frac{m_1}{\rho g S_1^2} \dot{Q}_{рег} - a_{\phi 1} Q_{рег}^2; \quad (4)$$

$$H_2 = H_{02} - \frac{m_2}{\rho g S_2^2} \dot{Q}_{нер} - a_{\phi 2} Q_{нер}^2; \quad (5)$$

$$Q = Q_{рег} + Q_{нер}; \quad (6)$$

$$M_{c1} = \frac{Q_{рег} H_1 \rho g}{\eta_1 \omega_{рег}}; \quad (7)$$

$$M_{c2} = \frac{Q_{нер} H_2 \rho g}{\eta_2 \omega_{нер}}; \quad (8)$$

$$H_{01} = k_n \omega_{рег}^2; \quad (9)$$

$$H_{02} = k_n \omega_{нер}^2, \quad (10)$$

де H_1 – напір регульованого насоса; H_2 – напір нерегульованого насоса; H_{cm} – статичний напір; H_{01} – фіктивний напір регульованого насоса; H_{02} – фіктивний напір нерегульованого насоса; $Q_{рег}$ – продуктивність регульованого насоса; $Q_{нер}$ – продуктивність нерегульованого насоса; a – гідравлічний опір мережі; $a_{\phi 1}$ – фіктивний гідравлічний опір регульованого насоса; $a_{\phi 2}$ – фіктивний гідравлічний опір нерегульованого насоса; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; η_1 – ККД регульованого насоса; η_2 – ККД нерегульованого насоса; m – маса води в трубопроводі мережі; m_1 – маса води в регульованому насосі; m_2 – маса води в нерегульованому насосі; S – площа поперечного перерізу трубопроводу мережі; S_1 – площа перерізу трубопроводу регульованого насоса; S_2 – площа перерізу трубопроводу нерегульованого насоса; M_{c1} – момент опору на валі регульованого насоса; M_{c2} – момент опору на валі нерегульованого насоса; k_n – коефіцієнт пропорційності.

Дослідження енергозберігаючої інтерактивної ЕМСАК насосними установками. Дослідження електромеханічної системи проводилося при допомозі програмного пакета Simulink.

Для дослідження використано два багатоступеневі вертикальні відцентрові насоси CV 125-30 потужністю 90 кВт [1]. Дані кожного насоса: $Q_n = 125 \text{ м}^3/\text{год}$; $H_n = 175 \text{ м}$, $\eta_n = 76 \%$; $H_{0n} = 212 \text{ м}$; $\omega_n = 216 \text{ рад/с}$; $a_{\phi} = 0,002 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год}^2)$ при $S = S_1 = S_2 = 1 \text{ м}^2$, $H_{cm} = 20 \text{ м}$.

Привідні двигуни – два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором 4A250M2Y3 [2]. Дані кожного двигуна: $P_{2n} = 90 \text{ кВт}$; $n_0 = 3000 \text{ об/хв}$; $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$; $f_n = 50 \text{ Гц}$; $\eta_n = 0,92$; $\cos \phi_n = 0,9$; $x_n = 5,2$ відн. од.; $R_1' = 0,02$ відн. од.; $x_1' = 0,078$ відн. од.; $R_2'' = 0,016$ відн. од.; $x_2'' = 0,13$ відн. од.; $J = 0,52 \text{ кгм}^2$.

Параметри ПЧ і ФП: $k_f = 5$ Гц/В; $k_{Um} = 31$ В/В; $T_{\mu 1} = T_{\mu 2} = 0,01$ с; $U_{3Um} = 6,67$ В; $U_0 = 31$ В; $k_{фП} = 0,135$ 1/В.

З метою спрощення процедури досліджень сумарний момент інерції на валі кожного двигуна прийнято рівним моменту інерції ротора двигуна.

Для зменшення часу розрахунків перехідних процесів, викликаних зміною швидкості, прийнято: $m = 10000$ кг; $m_1 = 3000$ кг; $m_2 = 3000$ кг.

Енергозберігаючий алгоритм функціонує при наступних значеннях параметрів: $U_{зфн} = 10$ В; $T_0 = 10$ с; $T_{\phi} = 0,1$ с; $k = 0,96$; $c = 10^{-8}$.

Результати дослідження роботи системи представлено на рис. 5.

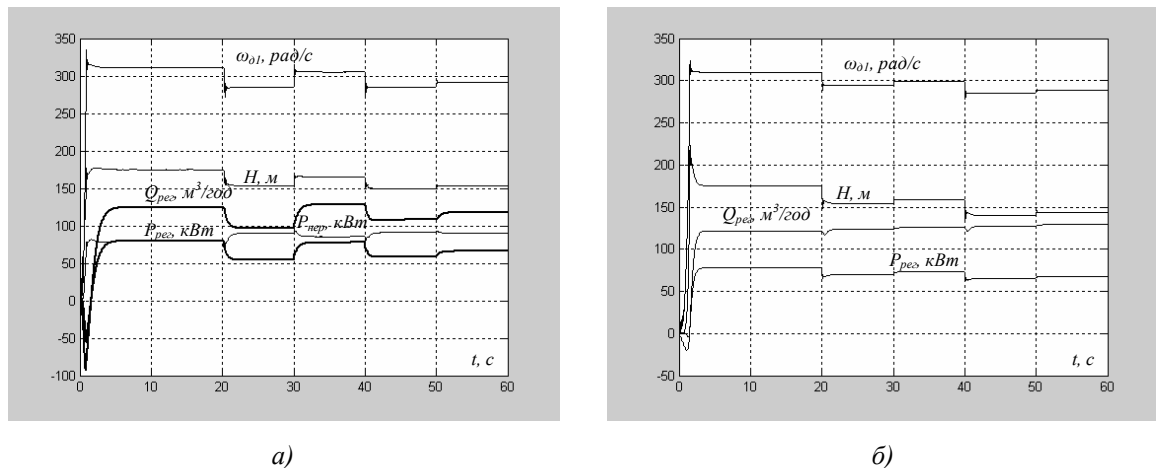


Рис. 5. Графіки перехідних процесів насосної установки

За час $2T_0$ здійснюється пуск системи при гідравлічному опорі $a = 0,0025$ м/(м⁶/год²). Працюють обидва насоси (рис. 5, а).

У момент часу 20 с швидкість регульованого насоса зменшується. Через 0,5 с споживачі знижують опір a на величину $0,0005$ м/(м⁶/год²) для збільшення продуктивності. При $t = 30$ с швидкість регульованого насоса зростає. Аналогічна картина спостерігається в моменти часу 40 с, 40,5 с, 50 с. При відсутності реакції споживачів швидкість насоса буде тільки зменшуватися внаслідок дії енергозберігаючого алгоритму.

У випадку, коли продуктивність регульованого насоса зменшиться до нуля, відбувається перерозподіл навантаження. Регульований насос збільшує оберти до максимальних і далі реагує на зміну водоспоживання аналогічно одноагрегатній установці (рис. 5, б).

Якщо робота одного агрегату не забезпечуватиме потреби споживачів – включиться нерегульований насос і режим буде відповідати двоагрегатній установці.

На рисунку: $P_{пер}$ – корисна потужність двигуна нерегульованого насоса; $P_{рег}$ – двигуна регульованого насоса.

Під час роботи двох насосних агрегатів на проміжку часу 60 с було спожито 2,7 кВт·год електроенергії.

Для порівняння проведено дослідження із застосуванням ПІ-регулятора напору з одиничними коефіцієнтами підсилення пропорційної та інтегральної складових. Коефіцієнт зворотного зв'язку за напором був прийнятий 0,047 В/м. Напір відповідав початковій величині, встановленій при застосуванні енергозберігаючого алгоритму. Зміна водоспоживання приймалася такою, щоб продуктивність насосної установки на відповідних інтервалах часу дорівнювала продуктивності під час проведення основного дослідження. При цьому використано електроенергії – 2,87 кВт·год.

Впровадження енергозберігаючого алгоритму в двоагрегатній насосній установці забезпечило економію 0,17 кВт·год (5,9 %).

Висновки. При паралельній роботі насосних агрегатів застосування енергозберігаючого алгоритму дозволяє зменшувати енергоспоживання, як і у випадку одноагрегатної насосної установки.

Для виключення ситуації, коли виникають мертві зони, регульованим приводом необхідно оснащувати найбільш потужні насоси з найбільш пологою характеристикою.

Потребує подальшого вдосконалення алгоритм роботи контролера при вмиканні та вимиканні нерегульованого електроприводу в процесі регулювання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Grundfos – WinCAPS версія 7.41, CD.
2. *Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А.* Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. *Лезнов Б.С.* Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
4. *Попович М.Г., Печеник М.В., Киселичник О.І., Соколовський О.Ф.* Енергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками // Електромашинобудування та електрообладнання. Одеський національний політехнічний університет. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 66. – Київ: Техніка, 2006. – С. 311–314.
5. *Попович М.Г., Печеник М.В., Киселичник О.І.* Енергозбереження в системах водопостачання при екстремальному керуванні насосними установками // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Енергозбереження в Україні: теорія і практика. – Київ, 2003. – С. 52–55.
6. *Попович М.Г., Киселичник О.І.* Електромеханічні системи автоматичного керування робочими параметрами турбомеханізмів на основі принципу пасивності// Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика // Вісник НТУ“ХП”. – 2004. – Вип. 43. – С. 16–19.

СОКОЛОВСЬКИЙ Олег Феліксівич – завідувач відділення «Електрифікація та автоматизація сільського господарства» Житомирського агротехнічного коледжу.

Наукові інтереси:

- енергозбереження в системах автоматизованого електроприводу;
- дослідження електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками.

Подано 19.07.2007