

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

ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРАКТИВНОГО АЛГОРИТМУ В СХЕМАХ БАГАТООГРЕГАТНИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

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

Досліджено впровадження інтерактивного алгоритму в схемах багатоагрегатних насосних установок з порівняльним аналізом енергозбереження при використанні зворотних зв'язків за продуктивністю та напором. Відмова від застосування зворотного зв'язку за частотою обертання нерегульованого електропривода спрощує технічну реалізацію при збереженні ефективності алгоритму.

Вступ. Енергозбереження в насосних установках передбачає використання новітніх технологій, що повністю або частково задовольняють вимоги нинішнього часу. Застосування регульованого електропривода з перетворювачами частоти відкриває нові можливості економії. Важливо розглянути методи керування, які розширюють перспективи впровадження частотнокерованого електропривода та враховують потреби споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка інтерактивної електромеханічної системи для одноагрегатної насосної установки створила передумови вагомого збільшення економії електричної енергії із незначними витратами на технічну реалізацію [4]. Робота енергозберігаючого алгоритму є більш ефективною при великій кількості споживачів, що забезпечує незначні зміни гідравлічного опору [5]. Правильне функціонування алгоритму залежить від коректного вибору коефіцієнта затухання, пов'язаного із суперечливими умовами бажаної інтенсивності зменшення швидкості, чутливості інтерактивного контролера до зменшення гідравлічного опору мережі та взаємовпливу насоса та електропривода через момент опору на валі. Вищого рівня енергозбереження можна досягнути при змінній величині коефіцієнта (при зменшенні швидкості мінімальне значення – 0,8, при збільшенні – від 0,99 до 1). Період квантування повинен перевищувати час перехідних процесів у системі, але не бути занадто великим, щоб не збільшувати час очікування споживачів на бажану зміну витрат води. Застосування енергозберігаючого алгоритму в багатоагрегатній насосній установці забезпечило достатній рівень енергозбереження та працездатність системи при ускладненні роботи алгоритму [7].

Постановка завдання. Інформація про частоту обертання двигуна нерегульованого насоса, продуктивність насосної установки не завжди буває технологічно доступною. Метою даної роботи є дослідження енергозберігаючого алгоритму при застосуванні зворотного зв'язку за напором та перевірка можливості відмови від зворотного зв'язку за частотою обертання нерегульованого електропривода в багатоагрегатних насосних установках.

Особливості роботи енергозберігаючого алгоритму. Алгоритм інтерактивного керування [4] побудований на принципі: водоспоживання зростає – швидкість насоса збільшується, водоспоживання зменшується або не змінюється протягом певного проміжку часу – швидкість насоса уповільнюється.

Для створення математичної моделі алгоритму використані наступні співвідношення:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Q_B}{Q_A}, \quad (1)$$

$$\frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{Q_C}{Q_B}, \quad (2)$$

де ω_3 – величина бажаної швидкості насоса;

ω_1, ω_2 – попередні швидкості насоса;

Q_A, Q_B, Q_C – продуктивності насосної установки у відповідних точках (рис. 1).

Для визначення бажаної частоти обертання використовуються значення продуктивності на попередніх кроках роботи алгоритму. Продуктивність Q_B створюється внаслідок зміни частоти обертання насоса. Її величина утримується протягом короткого проміжку часу, далі змінюється внаслідок реакції споживачів і не фіксується енергозберігаючим алгоритмом. Із формул (1), (2) випливає:

$$\omega_3 = \frac{Q_C}{Q_A} \omega_1. \quad (3)$$

У формулі (3) виключена залежність $\omega_3 = f(Q_B)$.

Виведемо співвідношення для побудови алгоритму з використанням інформації про напір, створений насосною установкою:

$$\frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} = \frac{H_B}{H_A}, \tag{4}$$

$$\frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} = \frac{H_B}{H_C}, \tag{5}$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{H_A}{H_C}} \cdot \omega_2, \tag{6}$$

де H_A, H_B, H_C – напори, створені насосною установкою у відповідних точках (рис. 1).

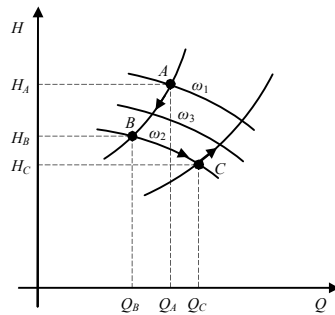


Рис. 1. Напірні характеристики насоса

Напір H_B не фіксується алгоритмом. Залежність $\omega_3 = f(H_B)$ у формулі (6) виключена.

Структурна схема енергозберігаючого алгоритму з використанням зворотного зв'язку за напором зображена на рис. 2.

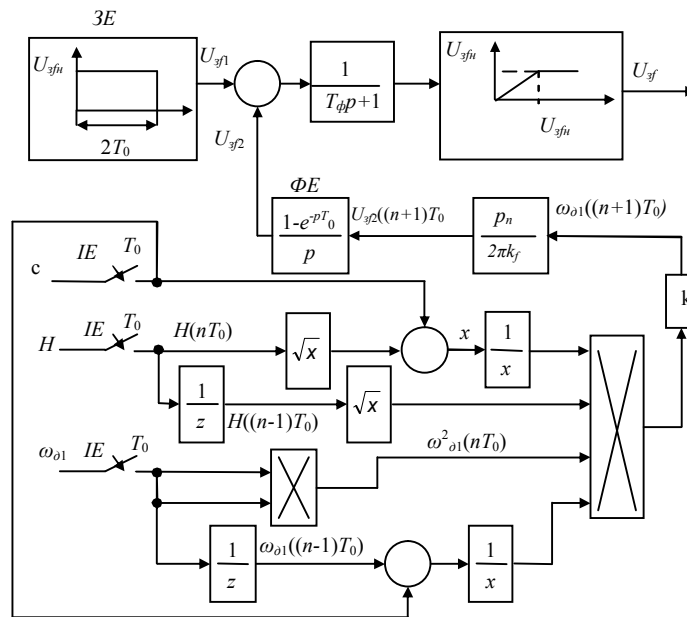


Рис. 2. Структурна схема енергозберігаючого алгоритму з

Задаючий елемент $ЗЕ$ формує сигнал зворотного зв'язку в вигляді напруги $U_{зф1}$, 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 напір насосної установки H та швидкість двигуна $\omega_{\delta 1}$ надходить в фіксовані моменти часу nT_0 за допомогою імпульсних елементів $ІЕ$. Ланки $1/z$ реалізують затримку сигналів на такт квантування. Формуючий елемент ΦE перетворює дискретний сигнал в аналоговий. Через нульові початкові умови роботи системи ($\omega_{\delta 1} = 0$) напруга $U_{зф2}$ буде дорівнювати нулю протягом $2T_0$.

Величина бажаної швидкості двигуна регульованого насоса:

$$\omega_{\delta 1}((n+1)T_0) = \frac{k\sqrt{H((n-1)T_0)}}{\sqrt{H(nT_0)+c}} \cdot \frac{\omega_{\delta 1}^2(nT_0)}{\omega_{\delta 1}((n-1)T_0)+c}, \quad (7)$$

де T_0 – період квантування; H – напір насосної установки; k – коефіцієнт затухання; c – мала стала для уникнення ділення на нуль; n – ціле додатне число.

Коефіцієнт затухання забезпечує працездатність алгоритму при відсутності реакції споживачів на зміну швидкості.

Застосування енергозберігаючого алгоритму при паралельній роботі агрегатів

Використання алгоритму в ЕМСАК паралельно працюючих агрегатів [7] забезпечило значний рівень економії електроенергії. Для визначення бажаної частоти обертання на кожному кроці роботи алгоритму використовувалась інформація про продуктивність установки, частоту обертання двигунів керованого та некерованого електроприводів. Із аналізу принципу дії енергозберігаючого алгоритму [4] випливає, що при відсутності зворотного зв'язку за швидкістю нерегульованого електропривода робота алгоритму не порушиться, кількість зворотних зв'язків зменшиться, при цьому технічна реалізація спрощується.

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 4А250М2У3 [2]. Дані кожного двигуна: $P_{2n} = 90 \text{ кВт}$; $n_0 = 3000 \text{ об/хв}$; $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$; $f_n = 50 \text{ Гц}$; $\eta_n = 0,92$; $\cos\phi_n = 0,9$; $x_{\mu} = 5,2 \text{ відн. од.}$; $R_1' = 0,02 \text{ відн. од.}$; $x_1' = 0,078 \text{ відн. од.}$; $R_2'' = 0,016 \text{ відн. од.}$; $x_2'' = 0,13 \text{ відн. од.}$; $J = 0,52 \text{ кгм}^2$.

Параметри перетворювача частоти і функціонального перетворювача: $k_r = 5 \text{ Гц/В}$; $k_{Um} = 31 \text{ В/В}$; $T_{\mu 1} = T_{\mu 2} = 0,01 \text{ с}$; $U_{3Um} = 6,67 \text{ В}$; $U_0 = 31 \text{ В}$; $k_{\phi II} = 0,135 \text{ 1/В}$.

Енергозберігаючий алгоритм функціонує при наступних значеннях параметрів: $U_{\phi n} = 10 \text{ В}$; $T_0 = 10 \text{ с}$; $T_\phi = 0,1 \text{ с}$; $c = 10^{-8}$, $k = 0,99$.

При пуску системи гідравлічний опір складає $0,0025 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год}^2)$. У момент часу 20 с енергозберігаючий алгоритм зменшує швидкість регульованого насоса. Через 0,5 с споживачі знижують опір на величину $0,0005 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год}^2)$ для збільшення продуктивності. Тому на момент часу 30 с швидкість регульованого насоса зростає. Аналогічно система працює в моменти часу 40 с, 40,5 с, 50 с.

На рис. 3, а відображені графіки перехідних процесів при застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю насосної установки, на рис. 3, б – при застосуванні зворотного зв'язку за напором насосної установки.

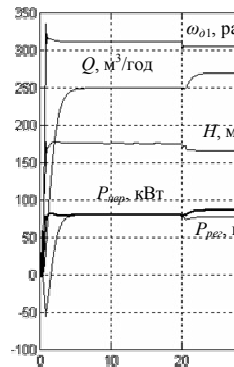


Рис. 3. Гра...

Під час роботи двох насосних агрегатів на проміжку часу 60 с було використано:

- 3 кВт·год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю;
- 3,1 кВт·год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за напором насосної установки.

Для порівняння проведено дослідження із застосуванням ПІ-регулятора напору з одиничними коефіцієнтами підсилення пропорційної та інтегральної складових та з коефіцієнтом зворотного зв'язку за напором 0,047 В/м. Напір відповідав початковій величині, встановленій при застосуванні енергозберігаючого алгоритму. Продуктивність насосної установки на відповідних інтервалах часу дорівнювала продуктивності під час проведення основного дослідження.

При використанні ПІ-регулятора спожито:

- на 0,09 кВт·год електроенергії більше порівняно з роботою установки із зворотним зв'язком за продуктивністю;
- на 0,07 кВт·год електроенергії більше порівняно з роботою установки із зворотним зв'язком за напором.

Впровадження енергозберігаючого алгоритму із зворотними зв'язками за продуктивністю та напором забезпечило економію 2,9 % та 2,2 % відповідно.

Застосування енергозберігаючого алгоритму при послідовній роботі агрегатів

Насосні агрегати 1, 2 (рис. 4) створюють напори H_1, H_2 та працюють з однаковою продуктивністю Q . Насос 1 приводиться в дію керованим електроприводом. Некерований електропривод забезпечує обертання насоса 2.

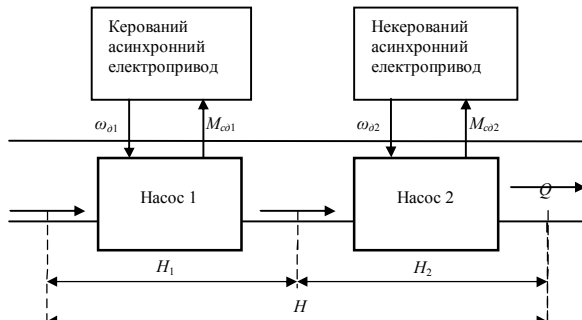


Рис. 4. Спрощена функціональна схема ЕМСАК при послідовній роботі насосних агрегатів

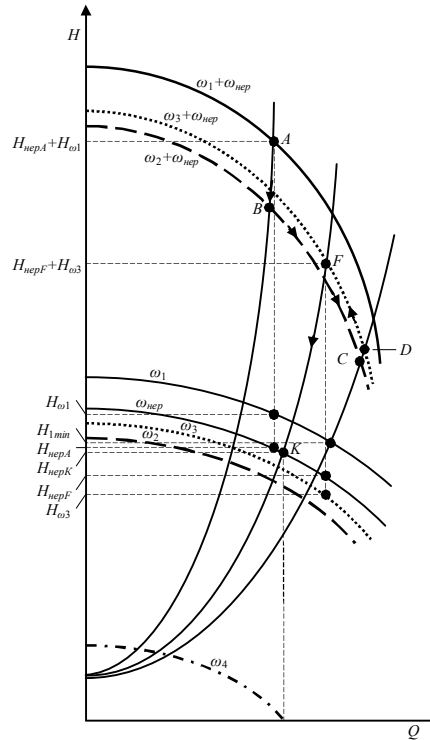


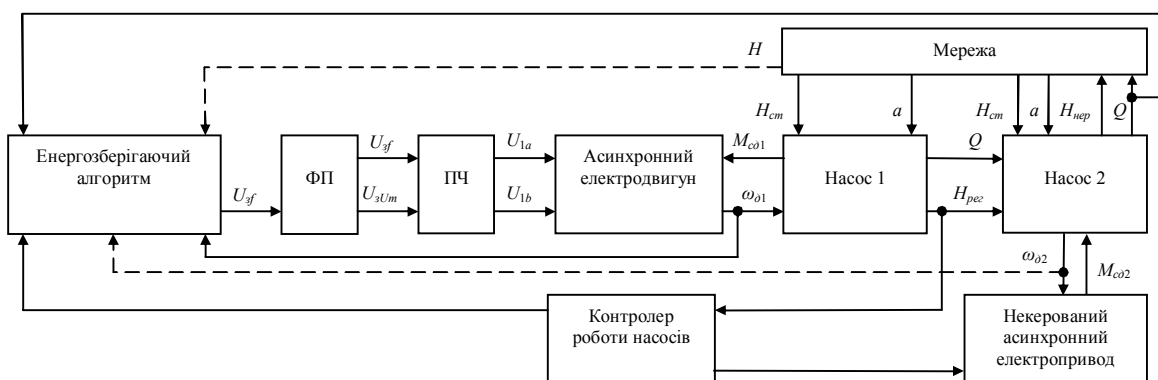
Рис. 5. Напірні характеристики при послідовній роботі насосних агрегатів та характеристики опору мережі.

На рис. 5 представлені напірні характеристики насосів та характеристики опору мережі. Характеристики $\omega_1 + \omega_{нер}, \omega_2 + \omega_{нер}, \omega_3 + \omega_{нер}$ отримані при графічному додаванні напорів насосних агрегатів за відповідної продуктивності.

Початок роботи установки визначається точкою А. Насос 1 обертається з частотою $\omega_{рег} = \omega_1$. При цьому створюється напір $H_{нерA} + H_{\omega 1}$. При зменшенні швидкості регульованого насоса робота установки переміститься в точку В. У залежності від потреб споживачів швидкість насоса та напір установки може зростати або зменшуватися. Якщо споживачі не реагують на зменшення напору – частота обертання буде продовжувати зменшуватися. Якщо опір мережі зменшиться (точка С) – частота обертання зросте і режим буде визначатися точкою D.

При переміщенні роботи установки в точку К, де напір регульованого насоса $H_{рег} = 0$, 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 напір зменшиться нижче H_{1min} і один насос не забезпечуватиме необхідного значення, то нерегульований насос повинен включитися, регульований – зменшити свої оберти.

Структурна схема ЕМСАК подана на рис. 6. Контролер роботи насосів вимикає нерегульований насос при $H_{рег} = 0$, подає команду на включення нерегульованого насоса при зниженні напору до значення H_{1min} .



Завдання амплітуди напруги $U_{зUm}$ формує функціональний перетворювач $\Phi\Pi$ на основі сигналу $U_{зф}$ енергозберігаючого алгоритму. Математична модель перетворювача частоти $\PiЧ$ ґрунтується на рівняннях симетричної системи напруг та перетворення 3–2. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором представлений двофазовою моделлю в системі координат $a-b$ [6]. Математична модель некерованого асинхронного електропривода розроблена на основі математичної моделі перетворювача напруги та двофазової моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Система рівнянь, що описує математичну модель насосної установки:

$$H_{01} + H_{02} = \frac{m}{\rho g S^2} \dot{Q} + a_{\phi 1} Q^2 + a_{\phi 2} Q^2 + a Q^2 + H_{ст}; \quad (8)$$

$$H_{рег} = H_{01} - a_{\phi 1} Q^2; \quad (9)$$

$$H_{нер} = H_{02} - a_{\phi 2} Q^2; \quad (10)$$

$$H = H_{рег} + H_{нер}; \quad (11)$$

$$H_{01} = k_n \omega_{рег}^2; \quad (12)$$

$$H_{02} = k_n \omega_{нер}^2; \quad (13)$$

$$M_{c1} = \frac{QH_{рег}\rho g}{\eta_1 \omega_{рег}}; \quad (14)$$

$$M_{c2} = \frac{QH_{нер}\rho g}{\eta_2 \omega_{нер}}, \quad (15)$$

де $H_{рег}$ – напір регульованого насоса; $H_{нер}$ – напір нерегульованого насоса; $H_{ст}$ – статичний напір; H_{01} – фіктивний напір регульованого насоса; H_{02} – фіктивний напір нерегульованого насоса; Q – продуктивність насосної установки; 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 та насосах; S – площа поперечного перерізу трубопроводів; M_{c1} – момент опору на валі регульованого насоса; M_{c2} – момент опору на валі нерегульованого насоса; k_n – коефіцієнт пропорційності.

Для дослідження використано насоси CV 125-30, асинхронні двигуни 4A250M2Y3. Параметри перетворювача частоти, функціонального перетворювача, енергозберігаючого алгоритму відповідають структурній схемі при паралельній роботі агрегатів [7]. Значення коефіцієнта затухання прийнято 0,975.

Пуск системи здійснюється при гідравлічному опорі $0,0025 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год}^2)$. Через 20 с швидкість регульованого насоса зменшується. Далі споживачі знижують опір для збільшення продуктивності. Це призводить до зростання швидкості регульованого насоса. На проміжку часу 40–60 с відбуваються аналогічні процеси.

На рис. 7, а та 7, б показано графіки зміни відповідних величин при застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю насосної установки та зворотного зв'язку за напором відповідно.

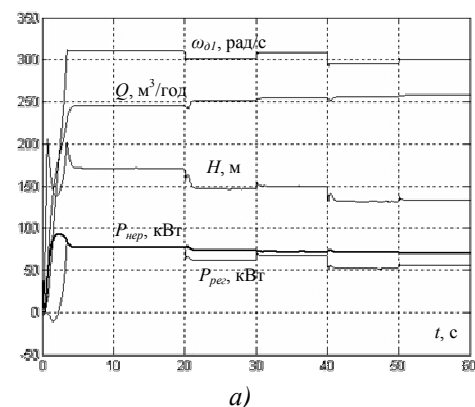


Рис. 7. Графіки переходних процесів

Під час досліджень протягом 60 с використано 2,56 кВт-год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю, 2,55 кВт-год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за напором насосної установки.

Застосування ПІ-регулятора збільшило кількість спожитої електроенергії на 0,16 кВт-год порівняно з роботою установки зі зворотним зв'язком за продуктивністю, на 0,18 кВт-год порівняно з роботою установки із зворотним зв'язком за напором.

Впровадження енергозберігаючого алгоритму із зворотним зв'язком за продуктивністю забезпечило економію 5,9 %. При використанні зворотного зв'язку за напором економія склала 6,6 %.

Висновок. Енергозберігаючий алгоритм забезпечує економію як в схемах паралельно працюючих, так і в схемах послідовно працюючих агрегатів. При паралельній роботі кращі показники отримані зі зворотним зв'язком за продуктивністю, при послідовній роботі – зі зворотним зв'язком за напором. Відсутність зворотного зв'язку за швидкістю нерегульованого електропривода спрощує реалізацію алгоритму при збереженні ефективності даного способу регулювання.

Подальші дослідження рекомендується направити на вивчення впливу інтенсивності зміни опору мережі, граничних значень коефіцієнта затухання на стійкість роботи багатоагрегатної насосної ЕМСАК.

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., Киселичник О.І., Бур'ян С.О., Соколовський О.Ф.* Експериментальні дослідження роботи інтерактивного енергозберігаючого контролера на гібридній моделі насосної установки // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2007. – Вип. 3. – С. 72–75.
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.
7. *Соколовський О.Ф.* Інтерактивна електромеханічна система автоматичного керування паралельно працюючими насосними агрегатами // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир, 2007. – Вип. 3. – С. 133–140.

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

Наукові інтереси:

– енергозбереження в системах автоматизованого електропривода;

– дослідження електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками.

Тел.: 8(0412)259-549, 8-097-578-77-54,

E-mail: of@ukr.net

Подано 06.09.2007