

---

## ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ІНТЕРАКТИВНІ АДАПТИВНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ З ВЕКТОРНО-КЕРОВАНИМИ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

---

### 1. Вступ

Подальше вичерпування енергоресурсів та їх постійне подорожчання визначає питання енергозбереження пріоритетним як у світі загалом, так і в Україні зокрема. Сучасні методи енергозбереження включають як формування енергоощадливого способу життя суспільства (соціальна реклама, тарифна політика, детальний облік споживання енергоресурсів), так і підвищення енергоефективності обладнання, установок за рахунок нових технологій та відповідних систем керування. У деяких конкретних галузях народного господарства можливе застосування оригінального підходу, який поєднує вищезазначене. Тобто, система керування технологічним процесом реалізується з урахуванням особливостей поведінки споживачів (суспільства) на основі ігрового підходу, в результаті чого забезпечується суттєве енергозбереження. Таке рішення досить просто впровадити в системах водопостачання.

На теперішній час використання частотно-керованих асинхронних двигунів для приводу насосів з метою регулювання продуктивності вже стає нормою. Адже, відомо, що зменшення швидкості насосу лише на 10 % дає до 27 % економії споживаної електроенергії, а в порівнянні з регулюванням за рахунок зміни опору мережі – до 40%. Подальшого підвищення рівня енергозбереження вітчизняні та зарубіжні науковці та розробники досягають за рахунок впровадження систем стабілізації напорів і рівнів, що автоматично змінюють швидкість насосів відповідно змінам споживання, та предиктного (з прогнозованими завданнями) програмного керування швидкістю насосів відповідно графікам добових потреб, які формуються наперед експериментальним шляхом [1]. Такий підхід не дає можливість ідентифікувати фактичні потреби споживачів в режимі реального часу, що призводить до зайвих втрат енергії. Реалізація предикторів на основі нейронних мереж з оновленням в режимі реального часу, яка пропонується окремими фахівцями, є складною і вельми затратною, причому не гарантується точна ідентифікація через неможливість точно вимірювати і математично формалізувати усі фактори, що впливають на споживання [1]. Ідентифікація потреб через непряму оцінку побутової (промислової) активності споживачів, наприклад через споживання електричної енергії, також є неточною і створює конфліктність інтересів водопостачальних компаній з енергопостачальними. Ігровий підхід дозволяє в режимі реального часу ідентифікувати фактичні потреби споживачів, стимулює споживачів до енергоощадливої поведінки, дозволяє в автоматичному режимі визначити і встановити мінімально-можливу швидкість насосу для задоволення потреб споживачів і є простим для технічної реалізації [2-4].

Ідея інтерактивного енергозберігаючого керування насосом полягає в наступному – завдання системи (швидкості насосу) на кожному наступному періоді квантування визначається співвідношенням продуктивностей на поточному та попередньому періодах [3]. Якщо теоретичне значення продуктивності, яке має виникнути при зміні швидкості, збігається з вимірним – то швидкість фіксовано зменшується. Якщо ці значення різні, то швидкість змінюється пропорційно цьому співвідношенню. Процес керування представляє собою гру поміж системою, що постійно прагне зменшити швидкість з метою енергозбереження, та споживачами, що прагнуть задовольнити власні потреби. В результаті знаходиться компромісне мінімально-можливе значення швидкості, на яке погоджуються споживачі. Такий підхід забезпечує до 10 додаткових відсотків збереження електроенергії в порівнянні з найбільш поширеним на теперішній час рішенням – системою стабілізації напору в диктуючій точці мережі [3].

### 2. Постановка задачі дослідження

Робота інтерактивного алгоритму спонукає споживачів до частоті зміни гідравлічного опору мережі, що викликає коливання моменту опору і відповідно швидкості валу двигуна (насосу). Таким чином виникають коливання продуктивності і затягується час перехідних процесів, який не повинен теоретично перевищувати період квантування енергозберігаючого контролеру. Застосування векторно-керованих асинхронних двигунів насосів з адаптуванням до зміни гідравлічного опору мережі [5] дозволяє надати процесу керування швидкістю властивість робастності щодо цього. При цьому перехідні процеси по продуктивності носять аперіодичний характер, а тривалість перехідних процесів за швидкістю не залежить від величини гідравлічного опору. Задачею роботи є модернізація інтерактивного енергозберігаючого алгоритму відповідно до вимог векторно-керованого асинхронного двигуна насосу з адаптуванням до гідравлічного опору мережі та дослідження його роботи.

### 3. Математична формалізація алгоритму

Структурна схема модернізованого інтерактивного алгоритму згідно структурної схеми алгоритму при частотному керуванні [3,4] та особливостей функціонування векторно-керованого асинхронного електроприводу з адаптуванням до гідравлічного опору мережі представлена на рис.1.

В порівнянні з алгоритмом для частотного керування задаючий елемент (ЗЕ) модернізованого включає до-

датковий початковий такт квантування необхідний для встановлення поточозчеплення ротора. Далі ЗЕ формує завдання швидкості приводного двигуна насосу  $\omega_1^*$ , яке відповідає номінальному значенню швидкості  $\omega_{\text{нн}}$  і утримується протягом часу  $2T_0$ . Період квантування  $T_0$  повинен перевищувати час перехідних процесів в системі водопостачання, викликаних стрибкоподібною зміною завдання швидкості.

Інформація про продуктивність насосу  $Q$  та швидкість двигуна  $\omega$  надходить до схеми реалізації алгоритму в фіксовані моменти часу  $nT_0$  (де  $n$  – ціле додатне число) за допомогою імпульсних елементів ІЕ. Величина бажаної швидкості двигуна на кожному наступному кроці алгоритму визначається залежністю

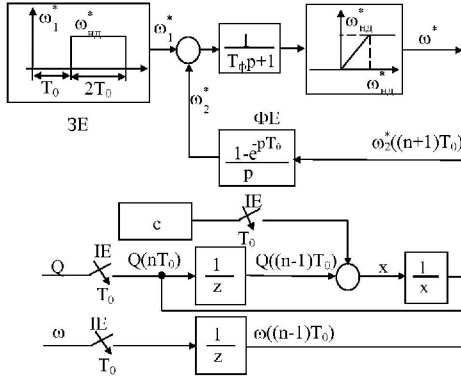


Рис. 1 Структурна схема модернізованого енергозберігаючого інтерактивного контролеру

$$\omega((n+1)T_0) = \frac{kQ(nT_0)}{Q((n-1)T_0) + c} \omega((n-1)T_0), \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт затування;  $c$  – мала стала для уникнення випадку ділення на нуль.

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

Формуючий елемент (ФЕ) перетворює дискретний сигнал  $\omega_2^*$  в аналоговий. Ланки  $1/z$  реалізують затримку сигналів на такт квантування.

Через нульові початкові умови роботи системи ( $Q=0, \omega=0$ ) сигнал  $\omega_2^*$  буде нульовим на час  $3T_0$ . Тоді значення завдання швидкості  $\omega_1^*$  визначатиметься лише завданням  $\omega_1^*$ , а далі – лише  $\omega_2^*$ .

Для зменшення стрибків струмів в двигуні насосу під час перехідних процесів завдання швидкості пода-

ється через аперіодичний фільтр зі сталою часу  $T_{\text{ф}}$ .

#### 4. Структурна схема інтерактивної адаптивної електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою

Структурна схема інтерактивної ЕМСАК насосною установкою з векторно-керуванням приводним асинхронним двигуном при живленні від джерела струму та алгоритмом адаптування до зміни гідравлічного опору мережі водогону відповідно до структурної схеми [5] представлена на рис.2, де ІК – інтерактивний контролер.

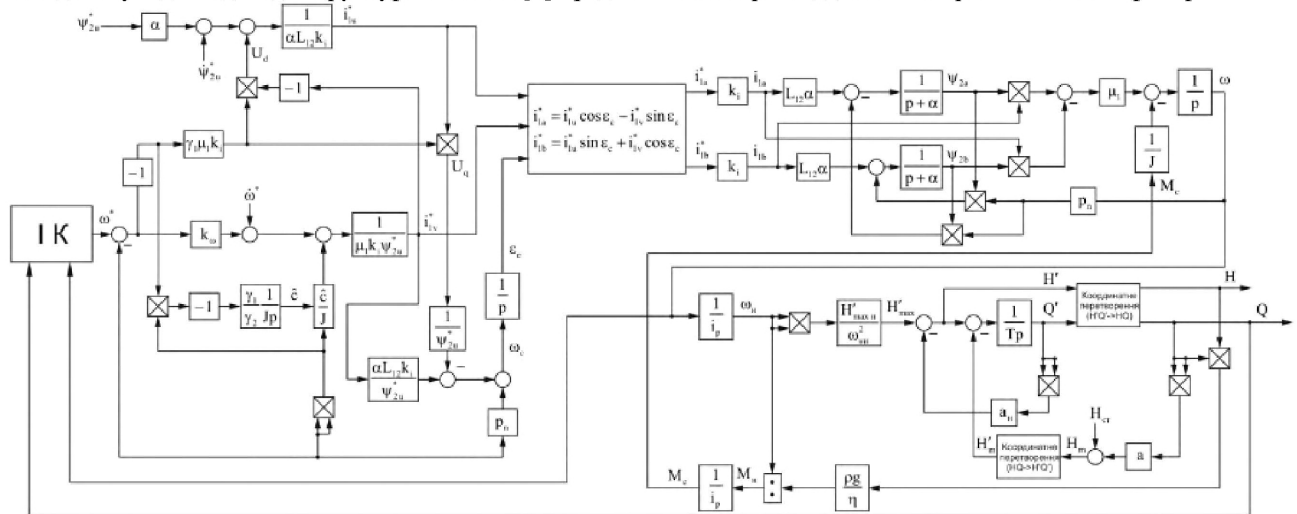


Рис. 2 Структурна схема інтерактивної ЕМСАК насосною установкою

Координатні перетворення, які описують перехід від точок напірної характеристики насоса в системі  $H'-Q'$  до точок у системі  $H-Q$  [5] і навпаки, визначаються матричними рівняннями

$$\begin{bmatrix} H' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r \sin \gamma + d \cos \gamma \\ -d \sin \gamma - r \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} H \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H' \\ Q' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -d \\ r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $\gamma, d, r$  – параметри, які характеризують положення системи координат  $H'-Q'$  відносно  $H-Q$  [5].

На схемі прийнято наступні позначення:  $i_{1a}, i_{1b}$  – проекції вектора струму статора на осі a-b системи координат статора;  $\Psi_{2a}, \Psi_{2b}$  – проекції вектора поточозчеплення ротора на осі a-b;  $i_{1a}^*, i_{1b}^*$  – величини завдань відповідних струмів;  $p_n$  – кількість пар полюсів двигуна;  $L_{12}$  – взаємна індуктивність обмоток статора і ротора двигуна;  $\alpha$  – відношення активного опору фази ротора до її індуктивності  $L_2$ ;  $M_c$  – момент опору на валу двигуна;  $J$  – приведений момент інерції на валу двигуна;  $\mu_1 = 3p_n L_{12} / (2L_2 J)$ ;  $k_i$  – коефіцієнт передачі джерела струму;  $\omega_n$  – швидкість обертання насоса;  $i_p$  – коефіцієнт передачі;  $M_n$  – момент на валу насоса;  $H$  – напір насоса;  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\eta$  – ККД насоса;  $H_{\text{ст}}$  – геодезична висота підйому води;  $\omega_{\text{нн}}$  – номіналь-

на швидкість насосу;  $N'_{\max II}$  - значення  $N'_{\max}$  [5] при  $\omega_n = \omega_{\text{шт}}$ ;  $T$  - стала часу;  $a_n$  - гідравлічний опір насосу;  $a$  - гідравлічний опір мережі.

Адаптивний алгоритм керування швидкістю двигуна [5], отриманий на основі метода Ляпунова, функціонує в системі координат потокозчеплення ротора, яка обертається зі швидкістю  $\omega_c$ . Проекції відповідних величин на осі цієї системи координат промарковано індексами  $u, v$ . Величини  $\gamma_1, \gamma_2, k_\omega$  - сталі додатні коефіцієнти, які вибираються при моделюванні. Змінні  $U_d, U_q$  - деякі додаткові сигнали, що забезпечують асимптотичну стійкість

контур швидкості. Параметр  $c$  є оцінкою коефіцієнта  $c$ , пропорційного відношенню моменту на валу двигуна до квадрата його швидкості. Фактично, це є непряма оцінка сумарного гідравлічного опору мережі та насосу.

### 5. Дослідження інтерактивної адаптивної електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою

Дослідження проведено для системи на основі відцентрового насосу марки CV 125-30 фірми Grundfos з наступними номінальними даними: потужність  $P_n=90$  кВт, частота обертання 2900 об/хв, напір  $H_n=198,7$  м, продуктивність  $Q_n=63,73$  м<sup>3</sup>/год, ККД  $\eta_n=0,587$ . В якості привідного асинхронного двигуна прийнято 4A250M2Y3 ( $P_n=90$  кВт,  $\eta_n=0,92$ ,  $n_0=3000$  об/хв,  $U_n=380$  В,  $\cos\phi=0,9$ ,  $X_\mu=5,2$ ,  $R_1'=0,023$ ,  $X_1'=0,078$ ,  $R_2''=0,016$ ,  $X_2''=0,13$ ,  $m_n=1,4$ ,  $m_M=1,2$ ,  $m_K=2,5$ ,  $s_n=0,018$ ,  $s_K=0,11$ ,  $J=0,25$  кг м<sup>2</sup>). При моделюванні приймалися наступні параметри структурної схеми  $k_\omega=60$ ,  $\gamma_1=0,001$ ,  $\gamma_2=100$ ,  $k_i=1$ ,  $J=0,25$  кг м<sup>2</sup>,  $\cos\gamma=1$ ,  $\sin\gamma=0$ ,  $d=0$ ,  $c=0$ ,  $a_n=0,00426$  м/(м<sup>6</sup>/год<sup>2</sup>),  $a=0,0243$  м/(м<sup>6</sup>/год<sup>2</sup>),  $T=0,5$  с,  $i_p=1$ ,  $\eta=0,6$ ,  $T_\phi=0,2$  с. Моделювання було проведено при початковому завданні швидкості 300 рад/с та геодезичному підйомі води на 70 м. Коефіцієнт затухання інтерактивного контролера вибирався 0,99, час квантування складав 1,5 с.

Результати дослідження роботи інтерактивного контролера при відсутності реакції споживачів на його роботу (незмінному гідравлічному опору) представлено на рис. 3. На проміжку часу від 0 до 1,5 с відбувається наростання потокозчеплення ротора до 0,92 Вб (рис.3.а) по аперіодичному закону зі сталою часу 0,2с. В час 1,5 с встановлюється максимальне завдання швидкості 300 рад/с, яке утримується протягом двох періодів квантування. Починаючи з 4,5 с, інтерактивний енергозберігаючий контролер насосної установки на кожному такті квантування фіксовано зменшує швидкість (рис.3.б) відповідно коефіцієнту затухання. При цьому перехідні процеси по швидкості, напору та продуктивності носять аперіодичний характер (рис.3.б,в).

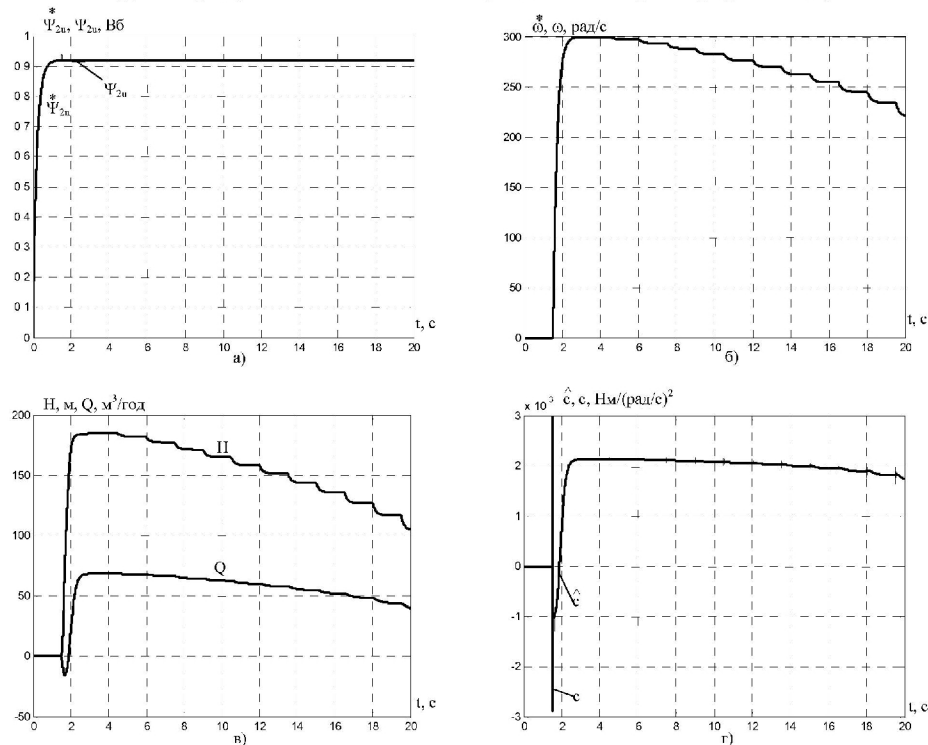


Рис. 3 Перехідні процеси в ЕМСАК при відсутності реакції споживачів:

а) за потокозчепленням ротора; б) за швидкістю; в) за витратами і напором; г) за оціночним параметром  $c$

Дослідження ЕМСАК при наявності реакції споживачів на роботу інтерактивного контролера представлено на рис. 4. Поведінку споживачів обрано такою, щоб величина  $Q$  підтримувалась на певному заданому рівні. Після встановлення швидкості (рис.4.б) продуктивність сягає рівня 68,5 м<sup>3</sup>/год (рис.4.в). В момент часу 4,5 с контролер зменшує значення швидкості. При цьому зменшується продуктивність, що не задовольняє споживачів. Тому в момент часу 5,5 с вони зменшують гідравлічний опір на 0,00075 м/(м<sup>3</sup>/год)<sup>2</sup> і продуктивність практично повертається до попереднього значення. В 6 с, коли розпочинається черговий такт роботи енергозберігаючого контролера, фактично продуктивність не змінюється, тому споживачі не реагують на роботу інтерактивного

контролера. Проте, в 7,5 с на наступному такті квантування продуктивність насосу зменшується, що не задовольняє споживачів. В момент часу 8,5 с вони зменшують гідравлічний опір на  $0,001 \text{ м}/(\text{м}^3/\text{год})^2$ . Це призводить до відновлення продуктивності до попереднього рівня. Далі відбуваються аналогічні процеси.

В обох випадках за такт квантування повністю завершуються перехідні процеси в векторно-керованому електроприводі насосу і відбувається ідентифікація гідравлічного опору мережі (рис.3.г, 4.г). Потокозчеплення ротора залишається сталим (рис.3.а, 4.а).

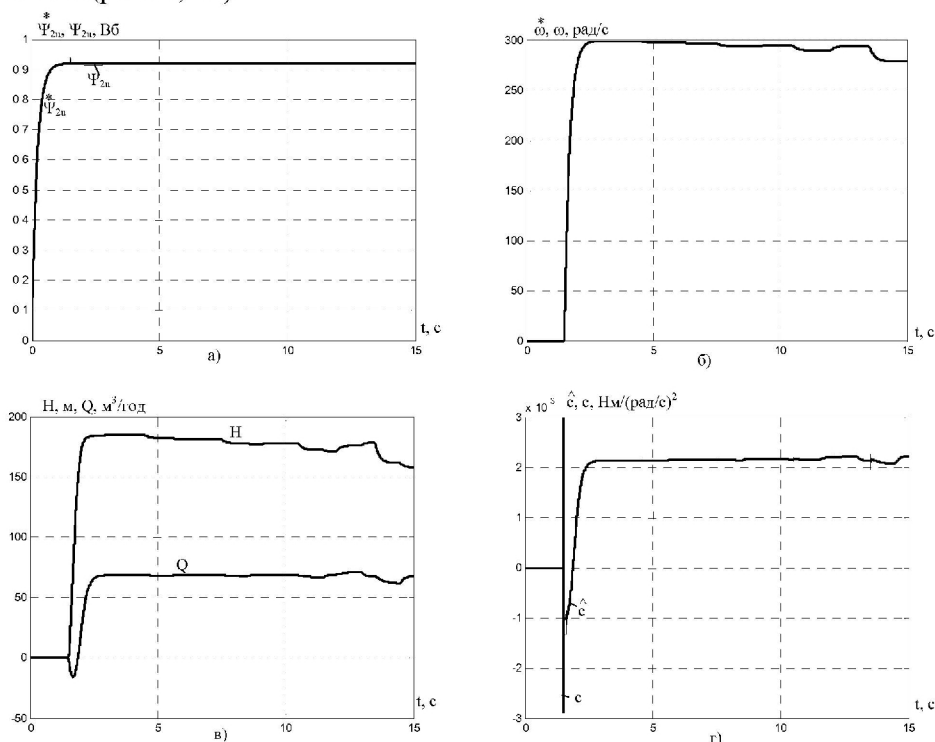


Рис. 4 Перехідні процеси в ЕМСАК при наявності реакції споживачів:

а) за потокозчепленням ротора; б) за швидкістю; в) за витратами і напором; г) за оціночним параметром  $c$

## 6. Висновки

Поєднання інтерактивного енергозберігаючого алгоритму керування насосною установкою з використанням векторно-керованого асинхронного двигуна та алгоритму адаптування до зміни гідравлічного опору мережі водогону забезпечує гарантовано меншу тривалість перехідного процесу за швидкістю насоса порівняно з періодом квантування інтерактивного контролера. При цьому перехідні процеси за продуктивністю є аперіодичними, що унеможливує виникнення умов хибної гри – коливань продуктивності. Вказаний електропривод також забезпечує плавний пуск насосної установки та однакову тривалість розгону насосу незалежно від величини гідравлічного опору та величини завдання швидкості. Початковий етап підготовки роботи інтерактивного контролера повинен включати три такти квантування: перший - коли забезпечується наростання до усталеного значення потокозчеплення ротора, і два такти квантування, при яких двигун розганяється до максимально можливої швидкості. Лише після цих трьох тактів квантування розпочинається інтерактивна гра.

## Література

1. Попович М.Г., Кіселичник О.І. Задачі автоматизації установок водопостачання на основі електромеханічних систем керування// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. №3/2008 (50). Ч.2. С.8-12.
2. Попович М.Г., Кіселичник О.І. Патент України №31195. Енергоефективний спосіб керування відцентровою насосною установкою системи водопостачання. Зареєстровано 25.03.2008.
3. Попович М.Г., Печеник М.В., Кіселичник О.І., Соколовський О.Ф. Енергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками// Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: проблеми автоматизованого електропривода. Випуск 66. Київ, „Техніка”, – 2006. С.311-314.
4. Попович М.Г., Кіселичник 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 імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2007 (44). –Ч. 1. С.72-75.
5. Попович М.Г., Кіселичник О.І., Бур'ян С.О., Бабаскін К.І. Адаптивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками з векторно-керуваними асинхронними двигунами// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. №3/2008 (50). Ч.1. С.72-78.