



УДК 628.292:681.32(07)

**Балюта С.М.<sup>1</sup>, Васічкін В.І.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Національний університет харчових технологій. Україна, Київ.<sup>2</sup> Науково-виробнича корпорація «Київський інститут автоматики». Україна, Київ**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРУВАННЯ НАСОСНИМИ СТАНЦІЯМИ****Анотація**

*Розроблено метод раціонального керування насосними агрегатами насосної станції та асинхронний електропривод з квазі оптимальним керуванням моментом, що забезпечують суттєве енергозбереження.*

**Abstract**

*The methods of efficient pump's aggregate controlling and asynchronous drives with optimal controlling by the moment has been developed. The drives resulting substantial energy saving.*

**Вступ**

У зв'язку із постійним зростанням цін на енергоносії та необхідністю впровадження енергозберігаючих технологій, розробка й впровадження способів керування технологічними процесами, що забезпечують мінімальне споживання електроенергії мають важливе народногосподарське значення. Застосування частотнорегульованого електропривода створює передумови для розробки принципово нової технології транспортування води або газу із плавним регулюванням робочих параметрів насосної установки без непродуктивних витрат електроенергії й із широкими можливостями підвищення точності й ефективності технологічних критеріїв роботи систем подачі.

**Постановка задачі**

Найважливішими заходами у системах водопостачання (СВ), спрямованими на енергозбереження, є автоматизація роботи насосних станцій і широке впровадження регульованого електропривода. Сучасний стан систем автоматизації насосних станцій передбачає широке використання комп'ютерних засобів і програмного забезпечення. При цьому традиційні підходи рішення завдання ресурсозбереження винятково засобами регульованого електропривода, коли всі насоси на насосній станції обладнаються регульованим електроприводом в багатьох випадках є економічно недоцільним, тому що суперечить принципу достатності [1].

На сьогоднішній день розробка енергозберігаючих технологій керування процесом водопостачання проводиться як шляхом оптимального диспетчерського керування процесом водопостачання абонентських гідромереж населеного пун-

кту в умовах детермінованого або стохастичного потоко-розподілу [2, 3], так і шляхом побудови автоматизованих систем керування насосним устаткуванням систем водопостачання [4–7].

Загальне завдання енергозбереження у системах водопостачання (СВ) можна розділити на два самостійні завдання: знаходження оптимальної конфігурації магістральної й абонентської гідромереж у нормальних режимах роботи СВ і в аварійних ситуаціях та енергозберігаюче керування технологічним устаткуванням насосної станції. Завдання енергозберігаючого керування технологічним устаткуванням НС поділяють на завдання: формування технологічного завдання для НС і регулювання тиску на виході НС відповідно до технологічного завдання. При розв'язанні першого із цих необхідно як можна повніше враховувати економічні втрати абонентів при зниженні тиску в контрольних точках абонентських гідромереж і збиток СВ, викликаний перевитратою електроенергії й втратами води внаслідок надлишкових тисків у контрольних крапках.

Завдання регулювання тиску на виході НС відповідно до технологічного завдання необхідно розв'язувати з урахуванням координації режимів роботи регульованих насосних агрегатів з метою максимізації поточного значення ККД. НС та енергозбереження у системах електроприводу насосних агрегатів.

**Основна частина**

При розробці САК особлива увага необхідно приділяти взаємодії регульованих і нерегульованих насосних агрегатів (НА), розміщених на одній станції. САК повинна передбачати не тільки зміну частоти обертання регульованих насосів, але й зміна числа працюючих нерегульованих НА.

Щоб уникнути утворення мертвих зон у процесі регулювання напірна характеристика регульованого насоса повинна розташовуватися трохи вище характеристики нерегульованого агрегату. Регульованим ЕП варто оснащувати найбільш великі насоси з найбільш пологими напірно-відатковими характеристиками.

**Алгоритм керування технологічним устаткуванням насосної станції**

Концепція системи енергозберігаючого керування процесом водопостачання полягає в

комплексному розв'язанні питань технічної й реалізації підсистем формування технологічного завдання для НС, енергозберігаючого керування режимом роботи технологічного встаткування НС, координації режимів роботи регульованих насосних агрегатів і регулювання тиску на виході НС. Для НС із паралельно працюючими насосними агрегатами поточне значення ККД розраховується за наступною формулою [8]:

$$\eta_{nc} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_{nc}}{\sum_{i=1}^m P_i(\omega_i) + \sum_{j=1}^{n-m} P_j} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot \left( \sum_{i=1}^m Q_i(\omega_i) + \sum_{j=1}^{n-m} Q_j \right)}{\rho \cdot g \cdot H \cdot \left( \sum_{i=1}^m \frac{Q_i(\omega_i)}{\eta_i(\omega_i)} + \sum_{j=1}^{n-m} \frac{Q_j}{\eta_j} \right)} \quad (1)$$

де  $\rho$  — густина рідини;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $H=H_{nc}$  і  $Q_{nc}$  — відповідно, тиск і подача НС (при паралельній роботі насосні агрегати розвивають однакові тиски);  $m$  — кількість працюючих у поточний момент часу регульованих насосних агрегатів;  $n$  — загальна кількість працюючих у поточний момент часу насосних агрегатів;  $Q_i(\omega_i)$ ,  $P_i(\omega_i)$ ,  $\eta_i(\omega_i)$  і  $Q_j P_j$ ,  $\eta_j$  — відповідно подача, споживана потужність і ККД, відповідно  $i$ -го регульованого й  $j$ -го нерегульованого насосного агрегату;  $\omega_i$  — швидкість обертання  $i$ -го регульованого насосного агрегату. Загальна подача НС  $Q_{nc}$  дорівнює сумарній подачі груп регульованих і нерегульованих насосних агрегатів.

При цьому ККД насосного агрегату в цілому обчислюється за формулою

$$\eta = \eta_n \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_{np}, \quad (2)$$

де  $\eta_n$ ,  $\eta_{эд}$ ,  $\eta_{np}$  — відповідно ККД насоса, електро-двигуна й перетворювального пристрою.

На основі даних про технічне обладнання [8] розраховується ККД насоса:

$$\eta_n = \frac{\rho g Q H}{N} = \frac{\rho \cdot g}{P \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_{np}} \cdot \left\{ B_0 \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 Q + B_1 \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right) \cdot Q^2 + B_2 \cdot Q^3 \right\} \quad (3)$$

де  $Q$  — подача насоса;  $H$  — тиск насоса;  $N$  і  $P$  — значення потужності, споживаної відповідно насосом і насосним агрегатом.  $B_0$ ,  $B_1$  і  $B_2$  — коефіцієнти  $Q$ - $H$  характеристики насоса, періодично оцінювані за методом найменших квадратів. При цьому використовується статистична інформація про тиск і подачу насоса, що періодично одержують у результаті випробувань насоса в

експлуатаційних умовах [9]. Значення ККД  $\eta_{эд}$  й  $\eta_{np}$  можуть визначені на основі паспортних даних, враховуючи, що в певних межах робочі характеристики насосного агрегату значення  $\eta_{эд}$  й  $\eta_{np}$  незначно відрізняються від номінальних [10]. У відповідності з технологічним завданням у кожний момент часу НС повинна забезпечувати задану величину тиску  $H_3$  при певній величині подачі  $Q_{nc}$ , що залежить від водоспоживання. У групі працюючих у поточний час регульованих насосних агрегатів можна виділити насосні агрегати з однаковими й різними робочими характеристиками. Враховуючи вказану обставину, оптимальну стратегію керування групою регульованих насосних агрегатів доцільно проводити в два етапів. По-перше, задане значення тиску  $H_3$  на виході НС технологічно доцільно підтримувати за рахунок безперервної синхронної зміни швидкості обертання регульованих насосних агрегатів з однаковими робочими характеристиками відповідно за ПІ- або ПІД-законами регулювання. Внаслідок цього робочі характеристики цих насосних агрегатів (подача, тиск, ККД і споживана потужність) змінюються однаково. По-друге, з метою оптимізації при зміні подачі НС на задану величину необхідно періодично координувати швидкості обертання інших регульованих насосних агрегатів. Вважаючи значення тиску на виході НС рівним  $H_3$ , а значення подачі  $Q_{nc}$  незмінним у поточний момент часу подача групи з регульованих і нерегульованих насосних агрегатів буде також незмінною в поточний момент часу. Таким чином, для оптимізації  $\eta_{nc}$  можна змінювати лише подачі окремих регульованих насосних агрегатів за умови незмінності їхньої сумарної подачі. Отже, завдання оптимізації поточного значення ККД НС зводяться до завдання мінімізації наступної цільової функції

$$F = \sum_{i=1}^m \frac{Q_i(\omega_i)}{\eta_i(\omega_i)} \quad (4)$$

при обмеженнях  $\omega_{\min i} \leq \omega_i \leq \omega_{\max i}$ ;

$$\sum_{i=1}^m Q_i(\omega_i) = Q_{nc} - \sum_{j=1}^{n-m} Q_j, \quad (5)$$

де  $\omega_{\min i}$  й  $\omega_{\max i}$  — межі припустимих значень швидкості обертання  $i$ -го регульованого насосного агрегату;  $n$  і  $m$  — відповідно, загальна кількість насосних агрегатів і кількість регульованих насосних агрегатів.

У результаті рішення цього завдання, що є завданням нелінійного програмування, визначають оптимальні швидкості обертання регульованих насосних агрегатів з різними робочими характеристиками.

Рациональна стратегія керування процесом водопостачання полягає в наступному. Для НС дискретно в часі (при істотній зміні водоспоживання) вирішується завдання мінімізації цільової функції (4) з використанням моделі постійного поточкорозподілу в гідромережі й алгоритму гідравлічного розрахунку поточкорозподілу [3]. У результаті отримують необхідні значення тиску  $H_3$  і подачі  $Q_3$  на виході НС. Вони доповнюються значеннями можливих відхилень  $\Delta Q^+$  і  $\Delta Q^-$  подачі НС, відповідно вгору й униз від заданого (розрахункового) значення  $Q_3$ , визначеними за допомогою статистичної моделі функціонування СВ, сформованої у попередній експлуатаційний період.

Технологічне завдання регулювання тиску на виході НС при коливаннях витрати в локальних абонентських гідро мережах виконує ПІ-регулятор тиску, що синхронно змінює швидкість обертання групи регульованих насосних агрегатів з однаковими робочими характеристиками. Плавний розгін забезпечується задатчиком інтенсивності. СК електроприводом насоса будується за принципом підлеглого регулювання, де зовнішнім контуром є контур регулювання тиску. При цьому для синхронного керування електроприводами насосів з однаковими робочими характеристиками можна використати керовані перетворювачі частоти з мікропроцесорними СК. Завдання на частоту розраховується при цьому по наступному алгоритмі

$$f_3 = f_3^- + (k_u + k_n)\Delta H - k_n\Delta H^-,$$

де  $f_3^-$  — завдання на частоту, розраховане на попередньому кроці;  $k_n$  і  $k_u$  — відповідно пропорційний і інтегральний коефіцієнти ПІ-регулятора тиску;  $\Delta H$  — різниця заданого й фактичного значень тиску;  $\Delta H^-$  — помилка по тиску на попередньому кроці.

При розрахунку враховуються також обмеження на робочу частоту й швидкість її зміни. Процес підтримки заданого тиску відбувається досить ефективно навіть при різких ступінчатих змінах гідравлічного опору магістральної гідромережі, точне настроювання коефіцієнтів ПІ-регулятора тиску не потрібно [11].

#### Алгоритми енергозберігаючого керування асинхронним електроприводом насосних агрегатів

Стратегія оптимізації обертаючого моменту двигуна полягає в такому керуванні моментом і потокоутворюючими складовими струму статора, щоб при заданому значенні струму статора машина розвивала максимальний момент, тобто робоча точка завжди лежала на максимумі відповідної кривої  $m_M = f(\omega_R)$  побудованої при  $i_s = const$  (рис. 1).

Для визначення оптимального моменту використовують рівняння обертаючого моменту двигуна:

$$m_M = \frac{3}{2} p \frac{L_m^2(i_\mu)}{L_R} i_{sd} i_{sq} \quad (6)$$

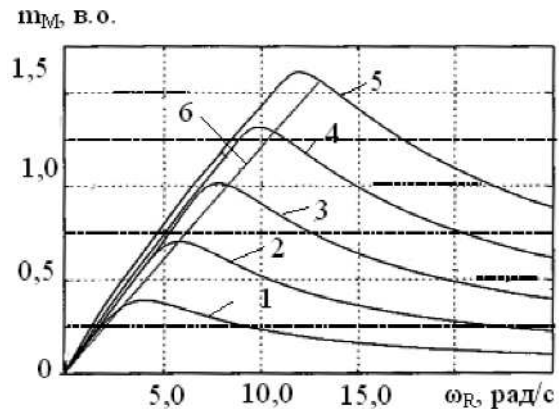


Рис. 1. Механічна характеристика для різних значень струму статора:

$L_m = const$ ; ... 1,  $i_d = i_{sd}$ ; 1 —  $i_s = 0,5$ ; 2 —  $i_s = 0,75$ ; 3 —  $i_s = 1,0$ ; 4 —  $i_s = 1,25$ ; 5 —  $i_s = 1,5$ ; 6 —  $i_{sdN} = const$

На підставі механічних характеристик  $m_M = f(\omega_R)$ , побудованих за умови  $i_s = const$  з урахуванням намагнічування магнітної системи  $L_m = f(i_\mu)$ , визначають співвідношення між струмом намагнічування  $i_{sd}$  й моментоутворюючою  $i_{sq}$  складовою струму статора, що забезпечують створення максимального моменту  $m_{Mmax}$  (рис. 1), використовуючи рівняння для струму намагнічування  $i_\mu$

$$i_\mu = \sqrt{i_{sd}^2 + \left(\frac{L_{R\sigma}}{L_R} i_{sq}\right)^2}, \quad (7)$$

рівняння для частоти ковзання ротора  $\omega_R$

$$\omega_R = \frac{R_R}{L_R(i_\mu)} \frac{i_{sq}}{i_{sd}} \quad (8)$$

і гранична умова

$$i_s^2 = i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \quad (9)$$

З огляду на ітераційний характер розрахунку оптимальних співвідношень між складовими струму статора з урахуванням насичення магнітної системи, для практичної реалізації алгоритму оптимального керування використовують співвідношення  $i_{sd} = i_{sq}$ , отримане як умова максимуму функції (6) при  $L_m = const$ , а при досягненні потокоутворюючого струму номінального значення  $i_{sdN}$  задають постійне значення  $i_{sd} = i_{sdN}$ . Номінальне значення потокоутворюючого струму  $i_{sdN}$  статора розраховується так

$$I_{sdN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}\omega_{sN}L_s(I_{sdN})} \quad (10)$$

Рівняння (10) також містить ітерації, однак при практичній реалізації вони проводяться тільки один раз на етапі ініціалізації, а не в реальному часі.

Представлена апроксимація струму  $i_{sd} = f(i_s)$  в області основного числа обертів показана як квазіоптимальна стратегія керування й дозволяє одержати характеристику обертаючого моменту  $m_M = f(i_s)$  практично співпадаючу з оптимальною характеристикою, отриманою з урахуванням намагнічування магнітної системи (рис. 2).

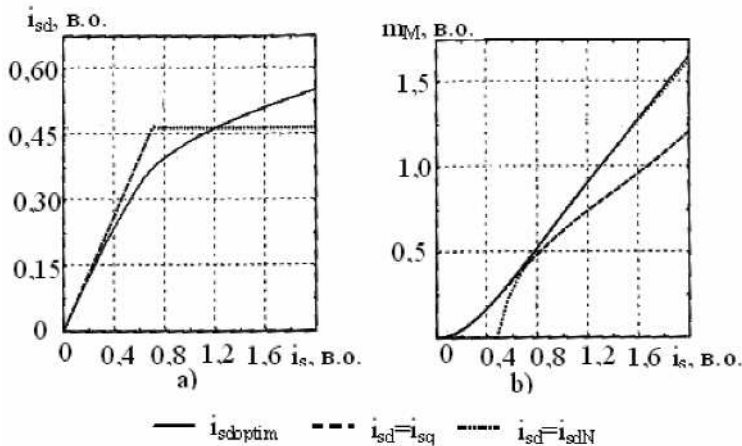


Рис. 2. Характеристики ЕМС із оптимальним і квазіоптимальним керуванням моментом

a – характеристика керування струмом намагнічування  $i_{sd} = f(i_s)$ ;  
b – регульовальна характеристика  $m_M = f(i_s)$

При завданні уставок потокоутворюючого струму  $i_{sd}$  й відповідно струму намагнічування  $i_m$  необхідно розрахувати мінімальне значення струму намагнічування, що забезпечує прийнятну динаміку регулювання ЕМС. При квазіоптимальному керуванні пропонується наступний простий алгоритм керування уставкою струму намагнічування:

$$m_i = \frac{\Psi R_{du}}{L_m} = \begin{cases} i_{sq,F} < i_{m,\min} \rightarrow i_{m,\min} \\ i_{m,\min} \leq i_{sq,F} < i_{mN} \rightarrow i_{sq,F} \\ i_{sq,F} \geq i_{mN} \rightarrow i_{mN} \end{cases} \quad (11)$$

При цьому  $i_{sq,F}$  це моментотворююча складова струму статора  $i_{sq}$ , що пройшла через фільтр низьких частот. Фільтр низьких частот і затримка установки потоку ротора забезпечують динамічну розв'язку між потоком і моментом. Очевидно, що запропонована система оптимального керування моментом не може бути використана в динамічному режимі при швидкому введенні потоку.

### Порівняння стратегій оптимізації керування асинхронними електроприводами

Вихідним пунктом цієї глави було керуванням станом асинхронних електродвигунів з погляду

режиму оптимального енергоспоживання. Оптимальне керування моментом уводилося через перевали в динамічному режимі з урахуванням обмеження струму й обмеження напруги. У цьому зв'язку цікаво провести порівняння методів керування по фактично досягнутому коефіцієнту корисної дії (ККД).

На рис. 3 показано ККД, що отримано для експериментального приводу (двигун 3 кВт) при різних методах керування. При навантаженні, що становить більше ніж половина номінального моменту криві для оптимального ККД і оптимального керування моментом приблизно ідентичні, тому що в загальних втратах домінують втрати в міді. При великих моментах обертання при керуванні з постійним потоком ротора ККД досягає ефективності інших методів, тому що ковзання наближається до оптимального значення. Значні розбіжності виявляються, зрозуміло, при середніх і малих моментах обертання. Тут очевидно знаходяться вирішальні можливості для покращення ККД при застосуванні методів оптимального керування. Для дослідженого приводу, оптимальне керування ККД досягає очевидних розбіжностей стосовно оптимального керування моментом лише при дуже великих числах обертів і

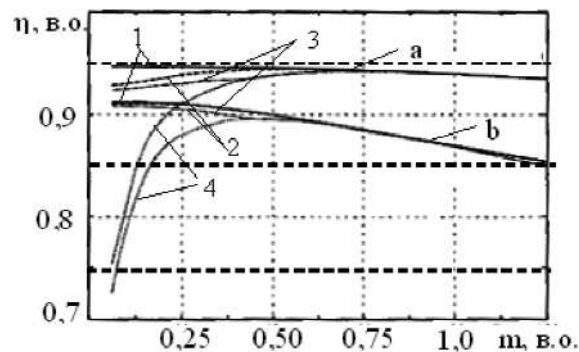


Рис. 3. Залежність ККД від навантаження для різних методів керування АЕП:

a –  $\omega_2 = 150$  рад/с; b –  $\omega_2 = 50$  рад/с.

1 – оптимальне керування коефіцієнтом корисної дії;  
2 – оптимальне керування моментом, точний розрахунок; 3 – квазіоптимальне керування моментом;  
4 – постійний потік ротора

малих навантаженнях, тому що в цьому режимі найбільшу частину становлять складові втрат у залізі. Також значення описаного методу наближеного оптимального керування моментом розташовані трохи нижче значень, отриманих для методу точного оптимального керування



моментом. При великих навантаженнях через підвищення повного струму встановлено зниження ККД для всіх методів керування. Ця тенденція сильніше виражена при малих числах обертів, тому що через менші втрати в залізі мінімум втрат зрушується до більш низьких значень ковзання і насичення основного потоку досягається раніше.

### Висновок

Максимальна ефективність автоматичного керування насосною станцією доцільно досягається при застосуванні алгоритмів раціонального керування процесом водопостачання та методів оптимального керування моментом асинхронного електропривода з векторним керуванням насосних агрегатів.

### Література

1. *Мамалыга В.М.* Практически важные задачи сбережения энергии, потребляемой машинами и механизмами с электроприводом, и принцип достаточности // Энергетика и электрификация. — 2000. — № 5. — С.40–44.
2. *Интегрированная диалоговая система рациональной эксплуатации и развития систем подачи и распределения воды* / Под ред. Евдокимова А.Г. и Самойленко Н.И. — Донецк: РИП Лебедь, 1994. — 194 с.
3. *Мальцев В.П., Евдокимов А.Г., Самойленко Н.И., Шавлов А.Т.* Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и регионов. — Златоуст: МАП "Златоустовская типография", 1996. — 232 с.

4. *Ильинский Н.Ф.* Опыт и перспективы развития энергосберегающего электрооборудования насосных станций // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции]. — Харьков: Основа, 1996. — С.160–161.

5. *Лезнов Б.С.* Экономия электроэнергии в насосных установках. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 144 с.

6. *Попович М.Г., Печеник М.Г., Кисельчик О.І.* Энергозбереження в системах водопостачання при екстремальному керуванні насосними установками // Техн. електродин. Тем. вип. Энергозбереження в Україні: теорія і практика. — К., 2003. С. 52–55.

7. *Тихоненков Б.П., Богомолов В.П.* К вопросу о расчете к.п.д. насосной станции // Промышленная энергетика, 1997. — № 12. — С. 32–34.

8. *Лезнов Б.С.* Экономия электроэнергии в насосных установках. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 144 с.

9. *ДСТ 6134-71* "Насоси динамічні. Методи випробувань".

10. *Чебанов В.Б.* Системы автоматического управления насосными установками // ВСТ: Водоснабжение и санитарная техника. Haustechn. — 1994, №1. — С.14–16.

11. *Барец Е.И., Браславский И.Я., Ишматов З.Ш.* Микропроцессорная система управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом насоса // Электроприводы переменного тока: [Труды конференции]. — Екатеринбург: УГТУ, 1998. — С.160–163.