

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ НАСОСНОЇ
УСТАНОВКИ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ****О.В. Бібік¹**, канд.техн.наук, **О.М. Попович¹**, докт.техн.наук, **С.П. Шевчук²**, докт.техн.наук¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: popovich1955@ukr.net

² – Національний технічний університет України "КПІ",

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Розроблено математичні моделі для комплексного дослідження і розробки заходів щодо підвищення енергоефективності режимів електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового житлового будинку, які враховують зміну: залежностей напору і ККД насосу із зміною подачі і частоти обертання; параметрів і втрат у асинхронних двигунах відповідно до режиму роботи; оптимального рівня напору насоса, який відповідає мінімуму втрат енергії у гідравлічних вентилях споживача. Розроблено методологію визначення та обґрунтовано доцільність застосування коефіцієнта енергоефективності при формуванні законів регулювання насосної установки багатоповерхового житлового будинку. Бібл. 11, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: асинхронний двигун, насосна установка багатоповерхового будинку, енергоефективність.

Із розширенням приватного сектору та збільшенням кількості житлових кварталів зростає зацікавленість у економному (за рахунок розв'язання пов'язаних проблем водо- і енергозбереження) водопостачанні квартир, що може бути досягнуто використанням індивідуального енерго- і ресурсозберігаючого насосного обладнання для окремих будинків. Сучасна тенденція розвитку електроприводу, у тому числі для об'єктів ЖКГ, полягає у активному використанні регульованого приводу замість традиційно нерегульованого, що дозволяє покращити його енергетичні характеристики, розширити діапазон регулювання продуктивності насосного агрегату за суттєвого зменшення споживання електричної енергії, підвищити ККД, збільшити енергоефективність системи в цілому [3,6,7,9]. У реальних умовах насосні установки (НУ) працюють із змінною подачею (у діапазоні 70...90%) і тиском. Тиск у трубопроводі зменшується через збільшення споживання води у вечірній і ранковий періоди. Регулювання при знижених витратах призводить до зменшення втрат енергії (на створення надлишкового тиску) та рідини за рахунок зменшення витоків у негерметичних стиках, а також до зменшення зношення обладнання і експлуатаційних витрат. Тобто, доцільною є стабілізація напору в напірному трубопроводі [6,9]. Для підтримки стабілізації необхідного тиску за умови нерівномірності споживання води протягом доби використовують інформацію з датчика тиску, який встановлюють на верхньому поверсі багатоповерхового будинку [2]. Для забезпечення енергоефективних режимів насосних комплексів на основі регульованих асинхронних двигунів (АД) визначають конкретні закони регулювання, які враховують характер навантаження та зміну технологічних параметрів [7].

Насосна установка багатоповерхового житлового будинку забезпечує підвищення напору у його трубопроводі для гарантованого підйому води на останній поверх у режимі максимальних витрат води. Відповідно до умов даного режиму здійснюється вибір насоса та приводного двигуна. При цьому, насос часто обирається за умови знаходження робочої точки за максимальної подачі біля правої межі його області економічної роботи, а також із відсутністю умов виникнення помпажу [11], які з'являються при перевищенні напору насоса за нульової подачі над величиною статичного напору водопровідної мережі. Двигун обирається за максимумом потужності на валу насоса. За нерегульованого електроприводу насоса зниження витрат води супроводжується зменшенням енергоефективності системи внаслідок перевищення напору насоса над необхідним напором мережі для даних витрат. Регулювання із стабілізацією величини напору [6] забезпечує підвищення енергоефективності НУ, проте не у максимальному об'ємі, оскільки не враховує особливості енергетичних характеристик усіх складових системи та їхній взаємний вплив.

Електромеханічна система (ЕМС) водопостачання складається з трубопроводу, насоса, асинхронного двигуна, регулятора частоти та напруги живлення, системи керування. Ефективність цієї системи оцінюють із визначенням: ККД перетворення електричної енергії у гідравлічну або енергоефективності, яка є співвідношенням витраченої електроенергії і отриманої корисної дії [11]. Викор-

ристання першого способу визначення критерію ефективності системи при її проектуванні і порівняльних дослідженнях не дозволяє мінімізувати втрати енергії у системі внаслідок зарахування до корисної дії непродуктивного надлишкового напору на виході насосу, який втрачається при дроселюванні у елементах гідравлічної мережі. Корисна дія такої системи полягає у підйомі заданої кількості води на потрібну висоту або у створенні мінімальної потрібної гідравлічної корисної потужності на виході насосу, яка визначається характеристикою гідравлічної мережі та її зміною.

Мета роботи полягає у визначенні можливостей підвищення енергоефективності електро-механічної системи (ЕМС) НУ багатоповерхового будинку завдяки регулюванню за законами, сформованими у результаті комплексного дослідження, що потребує: розробки математичних моделей системи і її складових для визначення параметрів робочих режимів із урахуванням впливу їхніх особливостей на характеристики складових, у тому числі з їхнім взаємним впливом; визначення та обґрунтування критерію комплексної оцінки енергоефективності системи.

Припущення та умови дослідження енергоефективних режимів роботи ЕМС НУ багатоповерхового будинку відповідають сталим режимам за зміни подачі, частоти обертання, напруги та частоти живлення, однаковим часовим закономірностям водоспоживання за поверхами, при цьому з'єднання АД з насосом виконується пружною муфтою. Математична модель призначена для дослідження будинків довільної поверховості, кількісна оцінка виконується для семи поверхів.

Характеристика водопровідної мережі будинку встановлює зв'язок втрат напору у ній із витратами. Особливості водопровідної мережі будинку обумовлені зміною її гідравлічного опору при зміні величини напору насосу. Зміна опору залежить від стану кінцевих дроселів – вентилів, ступінь відкриття яких мешканцями визначається попитом на воду і напором мережі.

Мінімальний достатній напір насосу H_{\min} , який забезпечить водопостачання останнього поверху, визначається втратами напору у його мережі з повністю відкритими вентилями і напором у стояку. За умови однакового водоспоживання на всіх поверхах отримано вираз, який характеризує корисну дію системи водопостачання

$$H_{\min} = \sum_{i=1}^k \left[h_{sti} + R_i \left(Q - Q \frac{i-1}{k} \right)^2 \right] = H_{st} + Q^2 \frac{1}{k^2} \sum_{i=1}^k \left[R_i (k+1-i)^2 \right], \quad (1)$$

де k – кількість поверхів; $h_{sti} = 2,7$ м, h_{sti} , H_{st} – статичні напори i -го поверху та результуючий; Q – подача насосу; R_i – гідравлічний опір ділянки стояка i -го поверху (для останнього поверху – його трубопроводу; для першого – трубопроводу від стояка до насосу).

Характеристики відцентрового насосу за зміни швидкості обертання ротора. Режим роботи насосу однозначно характеризують каталогові експериментальні залежності напору і ККД або споживаної потужності від подачі, які відповідають умовам сталої частоти обертання. Робота насосу у складі електроприводу, особливо регульованого, супроводжується зміною швидкості, що обов'язково повинно відображатися на характеристиках насосу при математичному моделюванні. Неадекватність моделі стосовно цієї зміни може призводити до похибок у десятки відсотків. У роботі [11] аналітично визначено залежності напору і ККД насосу у функції подачі для різних частот обертання двигуна з використанням каталогових характеристик, положень теорії подоби насосів, класичних припущень про розподіл втрат потужності у насосі. Дані аналітичні залежності характеристик насосу крім даних каталогу спираються на інформацію про максимум ККД насосу при деякій неномінальній швидкості і потребують визначення ряду апроксимаційних коефіцієнтів.

У представленому дослідженні (відповідно до закономірностей зміни характеристик насосу за подачею та обертами [11]) отримано і застосовано апроксимацію без залучення додаткових умов визначення апроксимаційних коефіцієнтів. Для цього використано ряд загальноприйнятих припущень: залежність ККД насоса від подачі води симетрична відносно лінії номінальної подачі; ККД залежить від подачі у степені 2,3 [6]; згідно з теорією подоби подача за максимуму ККД змінюється пропорційно швидкості обертання двигуна; максимум залежності ККД насоса від подачі та швидкості обертання має місце при номінальній швидкості; залежність зміни максимуму ККД від швидкості, як у [11], визначається за інформацією про максимуми ККД насосу при неномінальних швидкостях. З урахуванням викладеного, залежності напору насосу (H) і ККД (η) від подачі (Q) і швидкості (n) мають вигляд

$$H = H_0 \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 + A Q \left(\frac{n}{n_n} \right) - B Q^2; \quad \eta = \eta_m \left(1 - \left| \frac{Q \cdot n_n}{Q_n \cdot n} - 1 \right|^{2.3} \right), \quad \begin{cases} \eta_m = \eta_n \left[1 - \left(\frac{n}{n_n} - 1 \right)^{2m} \right], & n \leq n_n \\ \eta_m = \eta_n \left[1 - \frac{\eta_n - \eta''}{(n'' - n_n)^2} (n - n_n)^2 \right], & n \geq n_n \end{cases},$$

де $A = \frac{(H' - H_0)Q''^2 - (H'' - H_0)Q'^2}{Q'Q''(Q'' - Q')}$; $B = \frac{(H' - H_0)Q'' - (H'' - H_0)Q'}{Q'Q''(Q'' - Q')}$; $m = \frac{\ln(1 - \eta'/\eta_n)}{\ln(n'/n_n - 1)^2}$ –

інформація з каталогових характеристик: H_0 – величина напору при нульовій подачі; Q_n, η_n, n_n – номінальні подача, ККД, швидкість обертання; $(Q'; H')$, $(Q''; H'')$ – координати початку та кінця робочої ділянки напірної характеристики за рівнем ККД ($\eta \geq (0.9 \dots 0.95)\eta_n$); η', η'' – величини максимумів ККД насоса при швидкостях n', n'' , меншій та більшій за номінальну відповідно. Результат апроксимації характеристик насоса К-20/30 показано на рис. 1 для швидкостей 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 об/хв.

Математична модель асинхронного двигуна. Режими дослідження ЕМС НУ обумовлюють вимоги до математичної моделі АД: щодо її інтеграції до моделі ЕМС, врахування зміни втрат і електромагнітних параметрів АД. Цим вимогам задовольняє математична модель асинхронного двигуна електромехатронної системи при імітаційному та структурному моделюванні [8], яку застосовано у роботі.

Для врахування втрат у сталі при моделюванні режиму роботи паралельно АД до його вхідних клем приєднана система опорів, втрати у якій імітують величину втрат у сталі, що визначається за масою магнітопроводу і величиною питомих втрат у ньому відповідно до відомого виразу: $p_{cm} = p_{1,50} (f/50)^\alpha B_m^2$, де $p_{1,50}$ – питомі втрати у сталі шихтованого магнітопроводу із стандартною товщиною листів при індукції 1 Тл і частоті 50 Гц; f – частота живлення; α – коефіцієнт, що залежить від марки сталі, величина якого обумовлена співвідношенням втрат на гістерезис і вихрові струми; B_m – максимум індукції в магнітопроводі, який визначається при розрахунку магнітного кола за величиною сумарної МРС машини у даному режимі.

Потужність додаткових втрат у АД прийнята у розмірі 0,5% від номінальної спожитої потужності із коригуванням досліджуваного режиму пропорційно співвідношенню квадратів струму і номінального струму. Механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за трьома складовими: тертям у підшипниках, втратами у вентиляційному вузлі зовнішнього обдуву та аеродинамічними втратами всередині машини. У формулах визначення втрат на вентиляцію використана функціональна залежність від розмірів вентилятора та частоти обертання у третьому степені [1], що відповідає фізиці процесів. (У математичній моделі проектування асинхронних двигунів загального призначення механічні втрати визначаються в залежності від другого степеня частоти обертання. Забезпечити при цьому задовільну точність розрахунків дозволяють емпіричні коефіцієнти, що залежать від кількості полюсів ротора, і вузький діапазон зміни швидкості. Застосування такої залежності при значному діапазоні зміни швидкості призводить до суттєвих помилок: розраховуючи, наприклад, чотириполюсну машину при 3000 об/хв, ми, фактично, отримуємо варіант розрахунків при її роботі з вентилятором від двополюсної машини). Втрати у підшипниках залежать від навантаження на них, обумовленого вагою ротора та радіальним зусиллям, що діє на кінець вала. Максимум втрат спостерігається при однаковому напрямі дії цих двох чинників, мінімум – при їхній протилежній дії. Визначаючи радіальне зусилля на вал F_n згідно з [5], при сполученні двигуна з приводним меха-

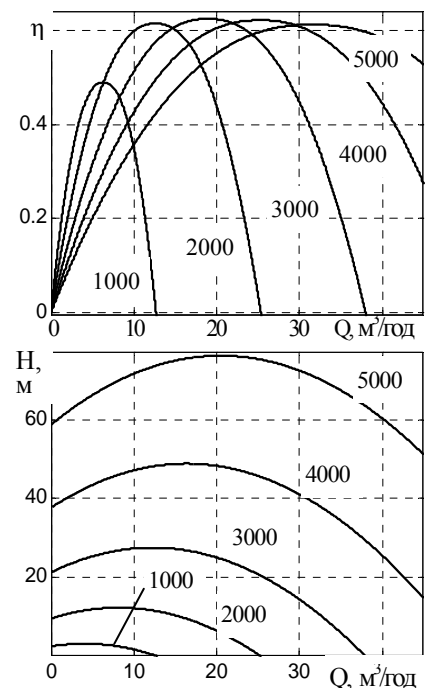


Рис. 1

нізом за допомогою пружної муфти і, припускаючи, що навантаження на підшипники є середнім арифметичним між максимальним та мінімальним, втрати у підшипниках розраховувалися за виразом

$$P_n = 3.75 \cdot 10^{-4} \omega_r \left[G_r + (F_n + G_n) \left(1 + \frac{l+2a}{L} \right) + \left| \frac{G_r}{2} - (F_n - G_n) \left(1 + \frac{l+2a}{2L} \right) \right| + \left| \frac{G_r}{2} - (F_n - G_n) \frac{l+2a}{2L} \right| \right], \quad (2)$$

де P_n – втрати у підшипниках, Вт; ω_r – частота обертання ротора, с^{-1} ; $F_n = P_2 C_n / (\omega_r R_e)$; $G_n = 3,51 \cdot 10^5 d^2 l$ – радіальні зусилля, прикладені до середини виступаючого кінця вала і обумовлені реакцією передачі та вагою напівмуфти, Н; G_r – вага ротора, Н; C_n – коефіцієнт типу передачі (для пружної муфти $C_n = 0,3$, [5]); d – діаметр виступаючого кінця вала, м; R_e – радіус передачі зусилля у муфти, прийнято $R_e = 1,5d$; $P_2 = M_e \omega_r - P_n - P_g - P_d$ – корисна потужність двигуна, Вт; M_e – електромагнітний момент двигуна; P_d – додаткові втрати; $P_g = (P_{\text{мех.н}} - P_{\text{пн}}) (\omega_r / \omega_{\text{рн}})^3$ – вентиляційні втрати; $P_{\text{мех.н}}, P_{\text{пн}}, \omega_{\text{рн}}$ – номінальні значення механічних втрат [10], втрат у підшипниках (2) при $F_n = 0$; $G_n = 0$, частоти обертання ротора відповідно; $l, (l+a), L$ – довжина виступаючого кінця вала, відстані від кінця вала до переднього підшипника і між підшипниками [4], м.

Результати моделювання номінального режиму у порівнянні із каталоговими даними для двигуна 4A90L2Y3 наведено у табл. 1. Розрахунок виконано за даними [4] при коефіцієнті заповнення пакету магнітопроводу сталлю 0,963; $p_{1.5,50} = 5,6$ Вт/кг; $\alpha = 1,3$; коефіцієнті збільшення втрат у сталі 2,5; розрахунковій робочій температурі 75°C .

Таблиця 1

Джерело інформації	Номінальні дані двигуна 4A90L2Y3						
	$P_{\text{мех.}}$	P_2	I_1	η	$\cos \varphi$	s	B_δ
	Вт	Вт	А	д.о	д.о.	д.о.	Тл
Каталог [4], методика [10]	49,1	3000	6,113	0,845	0,88	0,043	0,68
Математична модель, P_n за (2), $F_n = 0$	52,5	2998	6,111	0,841	0,884	0,043	0,67
Математична модель, P_n, F_n за (2)	67,4	2983	6,111	0,837	0,8841	0,043	0,665

Математичну модель ЕМС НУ у системі імітаційного моделювання MATLAB (бібліотека SimPowerSystems) представлено на рис. 2. Енергоефективність даної системи оцінюється за сталими режимами роботи, які можуть досліджуватися за результатами сумісного розв'язку систем статичних рівнянь складових системи. При цьому, для забезпечення точності математичного моделювання враховано нелінійні властивості складових системи і зв'язків між ними. Розв'язок статичних рівнянь з нелійними зв'язками здійснюють за допомогою ітераційних циклів, що часто ускладнюється проблемами їхньої збіжності. Ці проблеми відсутні при моделюванні об'єкта з нелійними параметрами системою диференціальних рівнянь. Така динамічна модель для забезпечення пошуку усталеного режиму в умовах нелінійностей параметрів і зв'язків реалізована у даній роботі.

У моделі системи (рис. 2), яка складається з блоків джерела живлення, асинхронного приводу, характеристик насоса та мережі, структурна математична модель АД [8] представлена блоком АД1. Її інтеграція до імітаційної моделі системи здійснюється трьома блоками виводів фаз обмотки статора із реалізацією схеми з'єднання «зірка». Математична модель АД за величинами напруги і частоти джерела живлення, а також частоти обертання дозволяє визначити величини електромагнітного моменту, корисної потужності і втрат АД. Математична модель насоса за заданою величиною витрат системи водопостачання і частоти обертання дозволяє визначити напір, гідравлічну корисну потужність і ККД насоса, потужність і момент на його валу. В залежності від співвідношення електромагнітного моменту АД і моментів опору насоса і механічних втрат у АД розраховується залежність зміни швидкості, яка впливає на характеристики двигуна і насоса. Перехідний процес закінчується із визначенням усталеного режиму, коли моменти рухомий та опору на валу стають рівними. У процесі розрахунку за величинами моментів електромагнітного та власного опору АД коригуються корисна потужність АД і втрати у його підшипниках. За результатами розрахунку режиму роботи АД ви-

значається величина індукції у повітряному проміжку, яка є вхідною величиною для визначення коефіцієнта насичення магнітного кола за основним полем, відповідних індуктивних параметрів АД і втрат у сталі. Дві-три ітерації у ручному режимі повторного розрахунку дозволяють визначити усталене значення індукції, що, враховуючи швидкодію моделі, не створює практичних складнощів.

За результатами розрахунку режиму визначаються ККД насосу – η_p , АД – η_{AD} , насосного агрегату – η_{agr}

як співвідношення відповідних вихідних і вхідних потужностей

$$\eta_p = \rho g Q H / P_2; \quad \eta_{AD} = P_2 / P_1; \quad \eta_{agr} = \eta \cdot \eta_{AD}, \quad (3)$$

де $\rho = 1010 \text{ кг/м}^3$ – густина води; H – напір насоса.

Дані ККД оцінюють ефективність перетворювачів енергії ЕМС НУ, але не можуть бути критеріями її ефективності при проектуванні та порівняльних дослідженнях, оскільки не враховують результуючої корисної дії системи. Для її визначення використовується математична модель гідравлічної мережі (1), яка за заданими витратами дозволяє розрахувати мінімальний достатній напір насосу $H_{opt} = H_{min}$ і гідравлічну оптимальну корисну потужність $P_{gopt} = \rho g Q H_{min}$, яка характеризує корисну дію системи і дозволяє визначити коефіцієнт її енергетичної ефективності K_{ef} як співвідношення оптимальної гідравлічної корисної потужності насоса і потужності споживання електричної енергії; ККД кінцевих гідравлічних вентилів мережі $\eta_{Г.В.}$, значення яких збільшуються із ступенем відкриття водопровідних кранів споживачами; інтегральний добовий ККД насосної ЕМС як співвідношення потенційної енергії піднятої води і спожитої електричної енергії K_{EMCp}

$$K_{ef} = P_{gopt} / P_1; \quad \eta_{Г.В.} = K_{ef} / \eta_{agr}; \quad K_{EMCp} = \frac{\rho g h_{st} 0,5(k+1)}{3600 \cdot W_{доб}} \sum_{j=1}^{n_e} Q_j T_j, \quad (4)$$

де $W_{доб}$ – споживання електричної енергії за добу, Вт·год; Q_j, T_j – подача та час у годинах j -го етапу добового графіка водоспоживання; n_e – кількість його етапів.

Математичне моделювання дозволяє коригуванням величини і частоти напруги живлення АД наближати напір насоса до оптимального і підвищувати енергоефективність системи. При цьому допустиме зменшення частоти живлення обмежується умовами виникнення помпажу і контролюється порівнянням статичного напору мережі і напору насоса при нульовій подачі. Допустиме (за нагрівом) зниження напруги живлення контролюється порівнянням поточної величини теплових втрат АД із їхнім номінальним значенням. З урахуванням цього моделювання дозволяє визначити оптимальний закон зміни частоти і напруги живлення АД в залежності від величини водоспоживання.

Результати чисельних експериментів дозволяють дослідити вплив способів регулювання ЕМС НУ на ефективність використання електричної енергії і виконати порівняльний аналіз доцільності застосування різних способів оцінки енергоефективності. Дослідження виконано на прикладі багатоповерхового будинку із добовим графіком водоспоживання, представленого узгоджени-

ff - chastota seti (blok pitaniy, RMS) - komandnaja stroka -- up

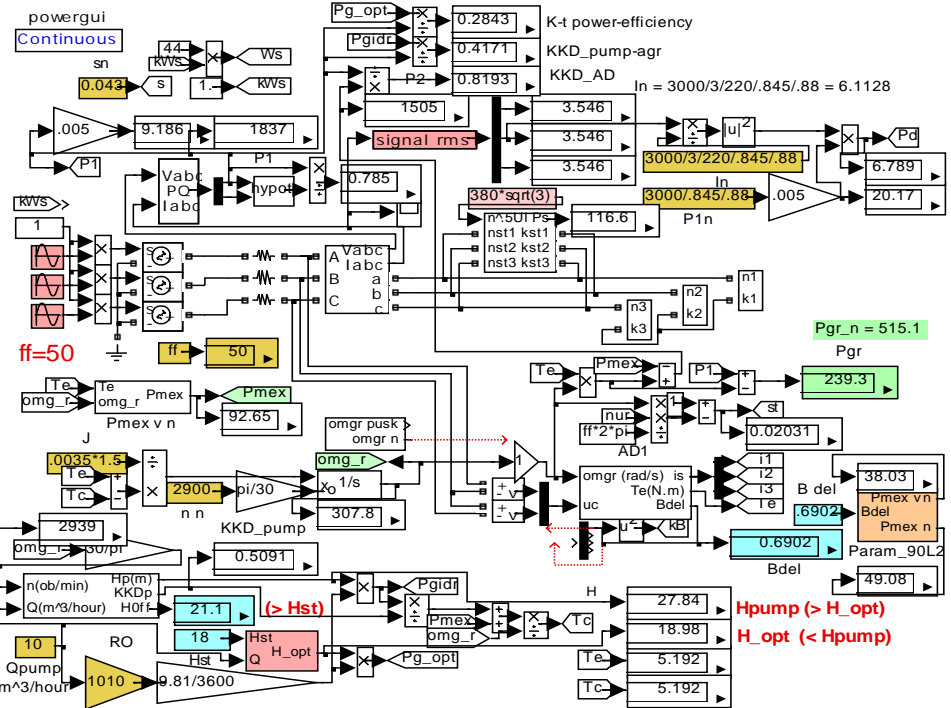


Рис. 2

ми масивами витрат води $[Q] = [2; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20]$, $\text{м}^3/\text{год}$ та відповідним часом споживання $[T] = [4; 2; 3; 2; 2; 3; 3; 5]$, год. Обрано відцентровий насос типу К-20/30 з АД потужністю 3 кВт.

Досліджено електромеханічні процеси насосного обладнання на основі асинхронного нерегульованого двигуна та визначено залежності: ККД нерегульованого АД і ККД насосного агрегату, критерію ефективності системи K_{ef} від витрат води згідно з добовим графіком водоспоживання, а також інтегральну добову характеристику – кількість енергії, яка споживається насосним агрегатом за добу: $W = \sum_{j=1}^{n_e} W_j = \sum_{j=1}^{n_e} (P_j T_j)$, де W_j – енергія, яка споживається агрегатом потужністю P_j за час T_j .

Електромеханічні процеси системи водопостачання насосного обладнання на основі регульованого асинхронного двигуна досліджено з метою визначення зміни максимальних значень ККД агрегату та коефіцієнта енергоефективності системи, які можна досягти при варіюванні величинами напруги та частоти живлення двигуна для різних витрат води стосовно добового графіку. Досліджено наступні електромеханічні процеси системи водопостачання насосного обладнання на основі регулювання АД за максимальним значенням критерію ефективності $K_{ef\max}$: а) оптимального регулювання насосного агрегату ($U = \text{var}$, $f = \text{var}$); б) частотного регулювання за законом $U/f = \text{const}$; в) регулювання АД із забезпеченням постійного (необхідного мінімального) напору ($H_{\min} = \text{const}$) у системі водопостачання будинку за максимальних витрат $Q = Q_{\max}$ згідно з графіком; г) на основі регулювання АД за максимальним значенням η_{agr} із $U = \text{var}$, $f = \text{var}$.

За результатами проведених досліджень для заданих витрат води за добовим графіком, варіюванням величини напруги і частоти живлення АД визначено такі їхні значення, які забезпечують максимальні величини коефіцієнта енергоефективності для цих режимів. На рис. 3 показано: пунктирними лініями залежності зміни ККД насосного агрегату (3), суцільними лініями – коефіцієнта енергетичної ефективності (4) у функції подачі для випадків: нерегульованого приводу; регулювання за критерієм максимуму коефіцієнта енергоефективності при незалежному регулюванні напругою і частотою і із збереженням залежності $U/f = \text{const}$.

Аналіз показує, що навіть для досліджуваного випадку, який дуже несприятливий для частотного регулювання внаслідок великої частки статичного напору, $H_{cm} = 18$ м (при напорі насоса за нульової подачі $H_0 = 21,1$ м, рис. 1), застосування оптимального регулювання забезпечує практично десятивідсоткове збільшення енергоефективності системи. Обмеження можливостей частотного регулювання пов'язано із квадратичним зниженням напору насоса відповідно до зниження частоти обертання і появою робочої точки нестійкої роботи насоса. У даному дослідженні при відсутності можливості подальшого зниження частоти обертання магнітного поля регулювання здійснювалося зміною напруги живлення. За умови фіксації співвідношення напруги і частоти – енергоефективність на 4% менша.

Співставлення залежностей η_{agr} і K_{ef} показує, що застосування комплексного, більш повного критерію ефективності K_{ef} (враховує гідравлічні опори мережі) збільшує достовірності оцінки ефективності системи. Завдяки

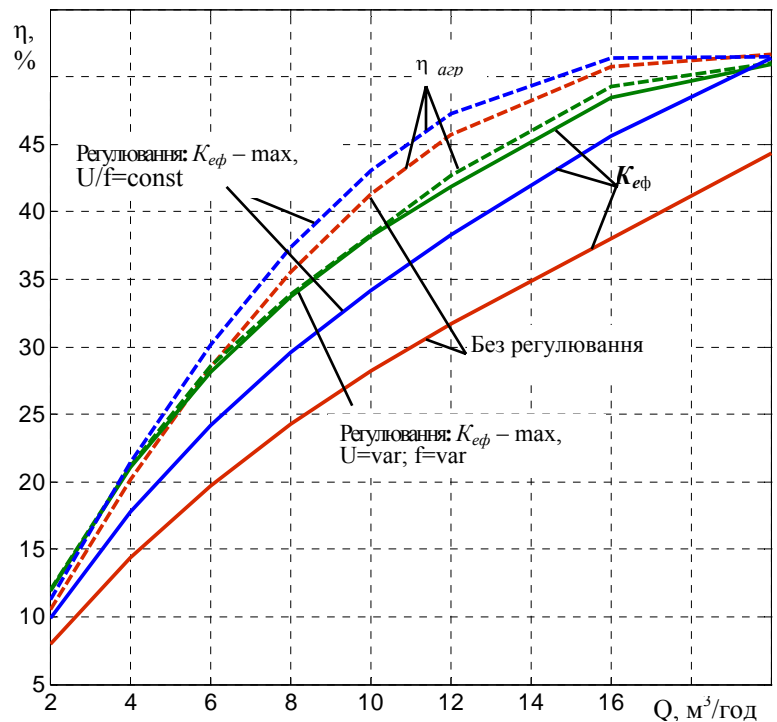


Рис. 3

цьому, при регулюванні за запропонованим критерієм K_{ef} (за максимумом коефіцієнта енергоефективності із незалежним регулюванням напруги і частоти), розбіжності залежностей K_{ef} і η_{a2p} мінімальні, що свідчить про мінімізацію втрат енергії у гідравлічних вентилях споживача. Залежності ККД цих гідравлічних вентилів від подачі представлені на рис. 4. Регулювання може забезпечити зменшення втрат енергії у них до 30%.

Результати порівняльного дослідження енерговитрат при варіантах регулювання системи водопостачання, які досліджено, зведено до табл. 2, де наведено розрахункові величини інтегральних добових $W_{доб}$ і річних витрат електроенергії $W_{річн}$ за заданого добового графіка водоспоживання; економії енергії, яку забезпечує регулювання у порівнянні з нерегульованим приводом ΔW ; інтегрального добового ККД насосної ЕМС K_{EMCp} , (4); ступінь його зміни завдяки регулюванню і річну економію коштів на оплату електроенергії $\Delta E_{річн}$.

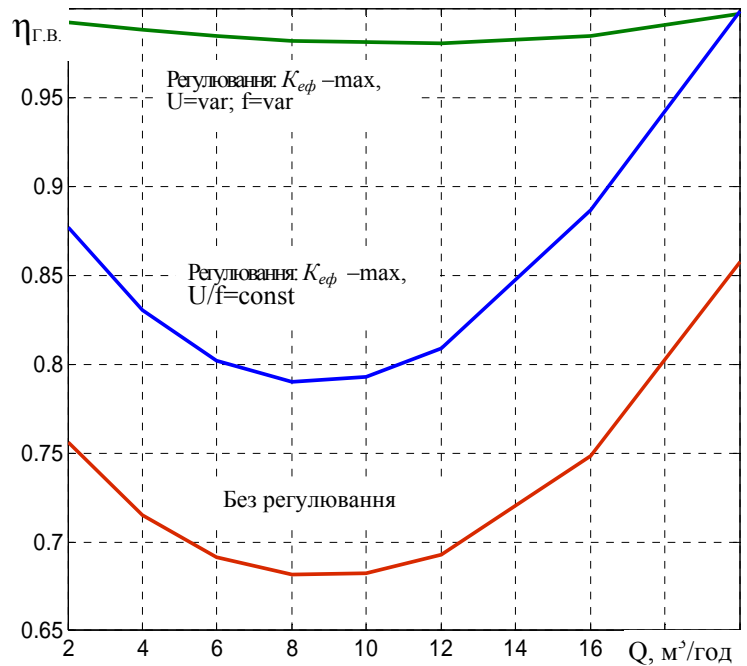


Рис. 4

Таблиця 2

Режим	$W_{доб}$, кВт·год	$W_{річн}$, кВт·год	ΔW , %	K_{EMCp}	$\Delta E_{річн}$, грн
Без регулювання	46,25	16881,25	–	0,1632	–
Регулювання: $K_{ef} - \max$, $U=var$; $f=var$	35,68	13023,2	22,85	0,2116	3858,05
Регулювання: $K_{ef} - \max$, $U/f=const$	38,558	14073,67	16,63	0,1958	3562,4
Регулювання: $K_{ef} - \max$, $H_{min} - const$, $U=var$; $f=var$	44,3	16169,5	4,22	0,1704	711,75
Регулювання: $\eta_{a2p} - \max$; $U=var$; $f=var$	39,66	14475,9	14,25	0,1904	2405,35

Висновки.

1. Розроблено комплексну математичну модель електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку, яка враховує: залежності напору і ККД насосу від продуктивності та частоти обертання; зміну електромагнітних параметрів і втрат у АД із зміною режиму роботи; зміну оптимального (мінімально достатнього) рівня напору насоса, який відповідає мінімуму втрат енергії у гідравлічних вентилях споживача.

2. Обґрунтовано доцільність застосування як критерію комплексної оцінки енергоефективності системи насосної установки коефіцієнта енергоефективності, що враховує гідравлічні опори мережі та дозволяє підвищити достовірність оцінки.

3. За результатами комплексного дослідження електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового житлового будинку встановлено, що реалізація розроблених авторами законів регулювання ЕМС забезпечує зниження витрат енергії на водопостачання до 23%.

1. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.

2. Воздвиженский В.В., Киселев В.И. Установка частотно-регулируемых приводов на электродвигателях насосов холодного и горячего водоснабжения ЦТП. Available at: <http://www.energosoвет.ru/stat461.html>. (accessed 09.02.2016)

3. Клевцов А.В. Средства оптимизации потребления электроэнергии. – М.: СОЛОН – Пресс, 2004. – 240 с.

4. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
5. Кравчик А.Э., Стрельбицкий Э.К., Шлаф М.М. Выбор и применение асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 96 с.
6. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М.: Энергоатомиздат. – 2006. – 360 с.
7. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Использование энергетически эффективных двигателей в регулируемом приводе насосов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 5. – С. 29–32.
8. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 4. – С. 25–32.
9. Сарач Б.М., Бастунский А.М. Заводские и натурные испытания насосных агрегатов с преобразователями частоты // Электротехника. – 1995. – № 7. – С. 19–20.
10. Радин В.И., Лондин Й., Розенкноп В.Д. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
11. Шевчук С.П., Попович О.М., Світлицький В.М. Насосні, вентиляторні та пневматичні установки. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 308 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ МНОГОЭТАЖНОГО ДОМА

Е.В. Биби¹, канд.техн.наук, А.Н. Попович¹, докт.техн.наук, С.П. Шевчук², докт.техн.наук

¹ - Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: popovich1955@ukr.net

² - Национальный технический университет Украины "КПИ", пр. Победы 37, Киев, 03056, Украина.

Разработаны математические модели (ММ) для комплексного исследования и определения мероприятий по повышению энергоэффективности режимов электромеханической системы насосной установки многоэтажного жилого дома. ММ учитывают изменения: напора и КПД насоса в зависимости от подачи и частоты вращения двигателя; параметров и потерь АД для различных режимов работы; оптимального (минимально достаточного) уровня напора насоса, который соответствует минимуму потерь энергии в гидравлических вентилях потребителя. Разработана методология определения и обоснована целесообразность применения коэффициента энергоэффективности при формировании законов регулирования насосной установки многоэтажного жилого дома. Библиограф. 11, рис. 4, табл. 2.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, насосная установка многоэтажного дома, энергоэффективность.

POWER EFFECTIVE MODES ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF PUMP INSTALLATION OF THE MULTISTOREY BUILDING

О.В. Bibik¹, О. М. Popovych¹, S. P. Shevchuk²

¹ - Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, e-mail: popovich1955@ukr.net

² - National Technical University of Ukraine «KPI», pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

Mathematical models (MM) for complex research and definition of actions for increase of energy efficiency of the modes of electromechanical system of pump installation of a multistoried house are developed. MM consider changes: a pressure and efficiency of the pump depending on giving and the frequency of rotation; the induction motor's parameters and losses for various operating modes; optimum (minimum sufficient) value of a pressure of the pump which corresponds to a minimum of losses of energy in hydraulic gates of the consumer. The methodology of definition of coefficient of energy efficiency is developed. The expediency of application of coefficient of energy efficiency when forming laws of regulation of pump installation of a multistoried house is proved. References 11, figures 4, tables 2.

Keywords: induction motor, pump installation of the multi-storey building, energy efficiency.

1. Balagurov V.A. Design of special electrical machines of alternating current. – Moskva: Vysshiaia shkola, 1982. – 272 p. (Rus)
2. Vozdvizhensky V.V., Kiselev V.I. Installation of frequency and adjustable drives on electric motors of pumps of cold and hot water supply of CHU. Available at: <http://www.energosoвет.ru/stat461.html>. (accessed 09.02.2016) (Rus)
3. Klevtsov A.V. Means of optimization of consumption of an electric power. – Moskva: SOLON-Press, 2004. – 240 p. (Rus)
4. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaia E.A. Induction motors of a series 4A. – Moskva: Energoizdat, 1982. – 504 p. (Rus)
5. Kravchik A.E., Strelbitsky E.K., Shlaf M.M. Selection and use of induction motors. – Moskva: Energoatomizdat, 1987. – 96 p. (Rus)
6. Leznov B.S. Energy saving and the adjustable drive in pump and pressure-blowing installations. – Moskva: Energoatomizdat. – 2006. – 360 p. (Rus)
7. Muravleva O.O., Tiuteva P.V. Use of energetically effective engines in the adjustable drive of pumps // Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika. – 2008. – No 5. – Pp. 29–32. (Rus)
8. Popovych O.M. Mathematical model of asynchronous electric machine for mechatronic system simulation and structural modeling // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2010. – No 4. – Pp. 25–32. (Ukr)
9. Sarach V.M., Bastunsky A.M. Production and natural tests of pump units with frequency converters // Elektrotekhnika. – 1995. – No 7. – Pp. 19–20. (Rus)
10. Radin V.I., Londin Y., Rozenkноп V.D. Unified series of induction motors of Interelektro. – Moskva: Energoatomizdat, 1990. – 416 p. (Rus)
11. Shevchuk S.P., Popovych A., Svetlitsky V. Pump, fan and pneumatic installation. – Kyiv: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 2010. – 308 p. (Rus)

Надійшла 12.02.2016
Остаточний варіант 13.04.2016