

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ ІЗ ДВОРІВНЕВИМИ СТОЯКАМИ

О.М. Попович^{1*}, докт. техн. наук, Р.В. Яшин^{2**}

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: popovich1955@ukr.net.

² НТУ України «КПІ ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Досліджено вплив структури електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку на її енергетичну ефективність. Надано кількісну оцінку зменшення корисної дії системи порівняно із подачею води на останній поверх в залежності від кількості поверхів. Розроблено комплексну математичну модель системи з одним та двома стояками (асинхронний двигун – насос – розгалужена гідравлічна мережа) із визначенням параметрів робочих режимів з урахуванням взаємного впливу складових системи. Кількісно оцінено величину критерію ефективності системи як відношення потенційної енергії води у споживача до спожитої енергії. Електромеханічна система водопостачання багатоповерхового будинку із двома рівнями стояків споживає енергії на 30 % менше, ніж система з одним стояком, завдяки зменшенню величини надлишкових напорів у споживачів нижніх поверхів і втрат у двигуні. Бібл. 12, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: асинхронний двигун, паралельне зонування системи водопостачання, енергоефективність.

Мережі водопостачання є потужними споживачами енергії у великих містах, а 40% витраченої на водопостачання енергії використовується на споживання насосами у будівлях [1], при цьому частка споживання енергії збільшується із збільшенням висоти будівлі. У Гонконзі, де середня висота будівлі більша за двадцять поверхів, для зменшення енергозатрат на підйом води поширені системи водопостачання з баками для акумулювання води: є системи з баками для збору води тільки на даху і є системи із баками на проміжних поверхах – каскадні системи водопостачання [1]. Такі системи вимагають окремих, спеціально облаштованих, технічних приміщень. За таких систем витрати енергії зменшуються завдяки забезпеченню високого ККД насосного агрегату у дискретному режимі наповнення баку. Аналогічну мету досягають й іншим підходом до зменшення енерговитрат на постачання води – за постачання змінною кількістю насосів. Ідея такого дискретного регулювання полягає у тому, щоб вмикати і вимикати насоси в залежності від потреб реального споживання: в пікові години збільшувати кількість працюючих насосів, а у разі зменшення навантаження – відключати. Як зазначено в [2], економія енергії за такого підходу складала 33,1%. Також високу енергоефективність насосного агрегату в умовах зміни водоспоживання забезпечує застосування систем регульованого приводу насосів із зміною напору насоса через зміну подачі [3].

Наведені приклади заходів з підвищення енергоефективності забезпечують високу енергоефективність насосного агрегату, але при цьому залишається проблема надлишковості гідравлічного напору у деяких споживачів розгалуженої системи водопостачання багатоповерхового будинку. Розгалужені системи водопостачання знаходять широке застосування у промисловості, житлово-комунальному та сільському господарствах. Характерним прикладом є електромеханічна система (ЕМС) водопостачання багатоповерхового будинку. Режими роботи таких систем пов'язані із надлишковістю гідравлічного напору у деяких споживачів внаслідок різної величини втрат у ділянках гідравлічної мережі насос – споживач, а також із вимогами до насосного агрегату стосовно забезпечення мінімально допустимим напором найбільш віддаленого споживача. Зниження надлишковості напорів досягають зонуванням (у випадку будинку – за висотою) водопровідних мереж: послідовним, коли насос кожної зони пропускає воду всіх споживачів, вищих рівнів за нього; паралельним, якщо вода до кожної зони потрапляє окремим стояком [4]. Перший випадок ускладнюється потребою у додаткових насосних приміщеннях, другий – у додаткових стояках.

Внаслідок надлишковості напорів, як показано у роботі [5], має місце низька ефективність перетворення споживаної електричної енергії до корисної потенційної енергії доставленої води. У випадку семиповерхового будинку [5] коефіцієнт енергетичної ефективності знаходився на рівні 20%. Його низька величина обумовлена великими гідравлічними втратами у вентилях споживачів нижніх поверхів. Проблеми надлишковості гідравлічного напору у деяких споживачів можна повністю позбутися у разі застосування індивідуальної насосної установки для кожного поверху, але при цьому треба враховувати зростання витрат на обслуговування і капітальні вкладення. Протиріччя між підвищенням енергоефективності та збільшенням капітальних витрат обумовлює потребу у порівняльних оптимізаційних дослідженнях конкуруючих варіантів системи водопостачання будинку задля визначення оптимальних величин її конструктивних параметрів [6]. На даному етапі виконаємо порівняльне дослідження енергетичної доцільності застосування дворівневої системи водопостачання житлового будинку за паралельного зонування.

Метою роботи є розробка і порівняльне дослідження енергоефективності ЕМС водопостачання розгалуженої структури, типу житлового багатоповерхового будинку, за дворівневого розподілу стояків за висотою водопідйому. Задля досягнення даної мети треба: проаналізувати кількарівневу структуру ЕМС водопостачання багатоповерхових будівель, розробити рекомендації з структур їхніх насосних агрегатів; обрати критерії порівняння систем водопостачання багатоповерхових будівель; розробити математичні моделі та програмні засоби порівняльного дослідження параметрів робочих режимів і величини інтегральних показників енергоефективності ЕМС напірного переміщення рідини із дворівневими стояками; сформулювати методологію чисельного експерименту (з наступною її реалізацією) для цілей дослідження ЕМС водопостачання розгалуженої структури за дворівневим розподілом стояків за висотою водопідйому у порівнянні з системою з єдиним стояком.

Математична модель для комплексного дослідження ЕМС водопостачання розгалуженої структури за дворівневим розподілом стояків за висотою водопідйому призначена для порівняльного дослідження систем з одним та двома стояками. Задля коректності порівняльного дослідження в основу аналізу покладено однакові умови стосовно властивостей насосів, двигунів, опорів гідравлічної мережі поверхів, ділянок стояків.

Витратна характеристика гідравлічної мережі системи водопостачання (на першому етапі аналізу розглядається система з одним стояком) залежить від ступеня відкривання вентилів у споживачів. Вираз даної характеристики можна отримати з урахуванням однакового водоспоживання за поверхами. При цьому, за заданої подачі насоса задля максимальної енергоефективності повинен бути забезпечений мінімально достатній напір для надійного водопостачання останнього поверху. Він визначається за мінімізації гідравлічних опорів вентилів споживачів. Споживачі забезпечують їхнє максимальне відкривання для отримання потрібних витрат води, а мінімально достатня величина напору стимулює даний процес. Таким чином, витратна характеристика мережі, яка відповідає максимальній енергоефективності режиму роботи, будується за мінімальними величинами гідравлічних опорів, а оптимальний напір насоса дорівнює мінімальним втратам напору у мережі [5, 7]. Для порівняльного дослідження системи з багаторівневими стояками вираз еквівалентної витратної характеристики гідравлічної мережі [5] доповнено коефіцієнтами збільшення гідравлічних опорів крайніх поверхів

$$H_m = h_1 + h_k + k_{R1} R_1 Q^2 + k_{Rk} \frac{R_k Q^2}{k^2} + \sum_{i=2}^{k-1} \left[h_i + R_i \left(Q - Q \frac{i-1}{k} \right)^2 \right], \quad (1)$$

де k – кількість поверхів; h_i – перепад висоти між горизонтальними трубопроводами i -го поверху і попереднього; Q – подача насоса; R_i – гідравлічний опір ділянки стояку i -го поверху; k_{R1}, k_{Rk} – коефіцієнти збільшення гідравлічного опору поверху у загальній схемі гідравлічної мережі у відносних одиницях опору стояку даного поверху з урахуванням: для останнього поверху – трубопроводу його горизонтальної розводки, для першого – трубопроводу від стояку до насоса. У припущенні сталості гідравлічних опорів ділянок стояку за поверхами R вираз (1) набуває виду

$$H_m = H_{st} + Q^2 \frac{R}{k^2} \left[k^2 k_{R1} + k_{Rk} + \sum_{i=2}^{k-1} (k+1-i)^2 \right], \quad (2)$$

де $H_{st} = \sum_{i=1}^k h_i$ – статичний напір води на останньому поверсі.

Вираз (2) дає змогу визначити величину гідравлічних опорів ділянок стояку за поверхами R , спираючись на координати робочої точки насоса H_p, Q_p з урахуванням, що у сталому режимі $H_m = H_p; Q = Q_p$. При цьому, з урахуванням, що напір є мінімально достатній, величина гідравлічних опорів відповідає максимальній енергоефективності режиму роботи із заданою робочою точкою. Виконаємо цю задачу на прикладі варіанта системи водопостачання семиповерхового будинку [5] з використанням насосу типу К-20/30. Апроксимацію характеристик напору насосу (H) і ККД (η) від подачі (Q) і швидкості (n) здійснено [5] за допомогою виразів

$$H = H_0(n/n_n)^2 + A Q n / n_n - B Q^2; \eta = \eta_m \left(1 - \left| \frac{Q \cdot n_n}{Q_n \cdot n} - 1 \right|^{2.3} \right), \begin{cases} \eta_m = \eta_n \left[1 - \left(\frac{n}{n_n} - 1 \right)^{2m} \right], n \leq n_n \\ \eta_m = \eta_n \left[1 - \frac{\eta_n - \eta''}{(n'' - n_n)^2} (n - n_n)^2 \right], n \geq n_n \end{cases}, \quad (3)$$

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

інформація з каталогових характеристик (напір у м, подача у $\text{м}^3/\text{год}$, швидкість обертання у *обертах за хвилину*): $H_0 = 21.1$ – величина напору за нульової подачі; $Q_n = 19$; $\eta_n = 0,625$; $n_n = 2900$ – номінальні подача, ККД, швидкість обертання; ($Q' = 10,3$; $H' = 27,2$), ($Q'' = 23,3$; $H'' = 23,2$) – координати початку та кінця робочої ділянки напірної характеристики за рівнем ККД ($\eta \geq (0.9 \dots 0.95)\eta_n$); $\eta' = 0,615$; $\eta'' = 0,62$ – величини максимумів ККД насоса при швидкостях $n' = 2000$; $n'' = 4000$, меншій та більшій за номінальну відповідно.

Для точки максимальної подачі у робочому діапазоні насоса К-20/30 ($Q'' = 23,3 \text{ м}^3/\text{год}$) системи водопостачання семиповерхового будинку, відповідно до (2) та (3), у припущенні тут і далі незмінної висоти поверхів $h_i = 2,8 \text{ м}$ і $k_{Rk} = 250$ (у коефіцієнті $k_{Rk} = 250$ враховано: гідравлічний опір труб розводки квартирою до найвіддаленішої точки в мережі, місцеві опори запірних вентилів, кутників, трійників тощо) і, що $k = 7$; $k_{R1} = 1$, визначено гідравлічний опір ділянок стояку за поверхами: $R = 0,000835 \text{ год}^2/\text{м}^5$. Повний еквівалентний опір мережі (множник при Q^2) за виразом (2) більший у 7,939 разів.

Комплексним критерієм енергоефективності ЕМС водопостачання [5] є співвідношення потенційної енергії доставленої споживачам води до спожитої електроприводом електричної енергії. Комплексні підходи до визначення критерію проектування є продуктивними для різних систем [8, 9] завдяки оцінці ефективності за кінцевим результатом. Для розгалуженої системи з одним стояком, яка розглядається, за рівномірності споживання води за поверхами, збільшення її потенційної енергії за одиницю часу (корисна потужність системи) визначається наступним чином:

$$P_u = \rho g \frac{Q}{k} \sum_{i=1}^k h_{sti} = \frac{\rho g Q H_{st}}{k^2} \sum_{i=1}^k i = \rho g Q H_{st} \frac{1 + \frac{1}{k}}{2}, \quad (4)$$

де $\rho = 998,23 \text{ кг/м}^3$ – густина водопровідної води; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; $h_{sti} = i h_i$ – статичний напір i -го поверху. Відповідно до (4) корисна дія розгалуженої системи зменшується у 1,33...2 рази (в залежності від кількості поверхів) порівняно із одноадресною подачею води на останній поверх.

Програмну реалізацію математичної моделі ЕМС наведено на рис. 1. Це дослідження виконано за номінальної величини електромагнітних параметрів АД. Бібліотечний блок АД (з параметрами АД 4А90L2У3, потужністю 3 кВт) підключено до джерела живлення через вимірювач. Параметри заступної схеми визначено за [10], механічні втрати – за [11]. У паралель до АД підключено блок еквівалентних опорів задля врахування втрат у сталі (визначено за [10, 12] для

номінального режиму) і додаткових. За вихідними сигналами вимірювача визначається величина споживаної АД потужності P_1 . Сигнал кутової швидкості з виходу блока АД подається на вхід блоку *Pump* разом з сигналом заданої подачі насосу, де за виразами (3) розраховується напір та ККД насосу. Ці величини разом із подачею та швидкістю забезпечують визначення моменту навантаження на вході АД. При цьому враховано, що робоча точка системи насос – мережа знаходиться на характеристиці насоса за заданої подачі. Тобто, еквівалентна характеристика мережі змінюється із зміною подачі. Це обумовлено зміною гідравлічних опорів кінцевих вентилів споживачів.

Корисна потужність ЕМС водопостачання визначається за виразом (4), а споживана потужність – за результатами моделювання (рис. 1) на вході АД. З урахуванням цих величин за задану циклограмою витрат протягом доби забезпечується визначення **інтегральної величини коефіцієнту енергоефективності**

$$Keef = \frac{\sum_{j=1}^J P_{uj} T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}, \quad (5)$$

де J – кількість етапів заданої циклограми добових витрат води із тривалістю T_j .

Комплексний аналіз ЕМС розгалуженої системи водопостачання багатоповерхового будинку потребує наявності інформації щодо ефективності роботи різних ланок системи. З цією метою визначено співвідношення енергій на входах та виходах насосного агрегату та АД. Подібно до (5) визначено величини коефіцієнтів енергоефективності насосного агрегату ($Keef_{PU}$) і АД ($Keef_M$)

$$Keef_{PU} = \rho g \frac{\sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}; \quad (6)$$

$$Keef_M = \rho g \frac{\sum_{j=1}^J \frac{Q_j H_j}{\eta_j} T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}. \quad (7)$$

Енергоефективність системи водопостачання (5), насосного агрегату (6), АД (7) визначено у випадку нерегульованого асинхронного приводу за умови, коли напір насосу перевищує величину мінімально достатньої величини напору за даної подачі (2). Різниця цих напорів дає змогу оцінити резерви енергозбереження із застосуванням регульованого електроприводу. Відносна економія енергоспоживання за застосування ідеальної системи регулювання із зведенням напору насосу до мінімально допустимих втрат напору у мережі може бути оцінена за виразом

$$\Delta W'_{\Delta H} = \sum_{j=1}^J Q_j (H_j - H_{mj}) T_j / \sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j. \quad (8)$$

Чисельний експеримент. Під час розрахунків енергоефективності ЕМС водопостачання семиповерхового будинку за моделлю рис. 1 (із добовим графіком водоспоживання, представленого узгодженими масивами витрат води $[Q_j] = [2; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20] \text{ м}^3/\text{год}$ та відповідним часом споживання $[T_j] = [4; 2; 3; 2; 2; 3; 3; 5] \text{ год}$, [5]) величина коефіцієнту енергоефективності (5) становить: $Keef = 0,1761$. Покази дисплеїв на рис. 1 відповідають першому елементу масиву витрат заданої циклограми.

За визначеними параметрами ЕМС водопостачання семиповерхового будинку оцінимо такі ж параметри для 12 поверхів у випадку сталості водоспоживання одного поверху і з одним стояком. Залишаємо незмінними величини: h_i, k_{R1}, k_{Rk}, R . Для $k=12$ повний еквівалентний опір мережі за

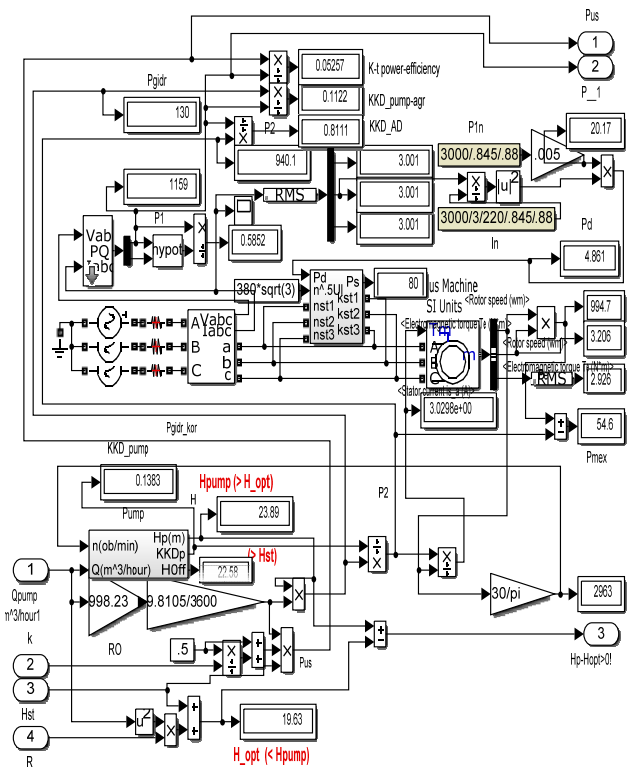


Рис. 1

виразом (2) більший за R у 6,243 рази. Відповідно до збільшення кількості поверхів треба змінити експлуатаційні характеристики насосу.

Задля коректності порівняльного дослідження аналіз виконується за однакових енерго-ефективних властивостей насосів різних варіантів системи. Це досягається трансформацією напірних характеристик насосу К-20/30 відповідно до потреб варіанту системи без зміни властивостей енергоефективності. Таким чином, для випадку 12 поверхів ($k=12$) застосуємо модельний насос, характеристики якого отримуємо після збільшення величин напорів і подач у вихідних даних (3) насосу К-20/30 з коефіцієнтом 12/7. На рис. 2 показано отримані напірні характеристики насосів (H_{7-1c} , H_{12-1c}), залежності їхніх ККД (η_{7-1c} , η_{12-1c}), еквівалентні витратні характеристики мережі (H_{m7-1c} , H_{m12-1c}) для варіантів 7-ми та 12-ти поверхових будинків відповідно з

єдиним стояком для всіх поверхів. Характеристики мережі відповідають стану вентилів споживачів за мінімально достатньої величини напору за даної подачі (1), (2). Відповідно до зміни характеристик насосу, потужність його двигуна для 12-ти поверхового будинку треба збільшити у $144/49=2,94$ рази. Це досягається застосуванням АД 4A112M2У3 із номінальною потужністю 7,5 кВт. За таких умов за використання моделі рис. 1 розрахунок інтегральної величини коефіцієнту енергоефективності за виразом (5), із збільшеною подачею у 12/7 разів порівняно із попереднім варіантом показав, що $Keef=0,1697$. Тобто, збільшення кількості поверхів з 7 до 12 зменшило енергоефективність на 3%.

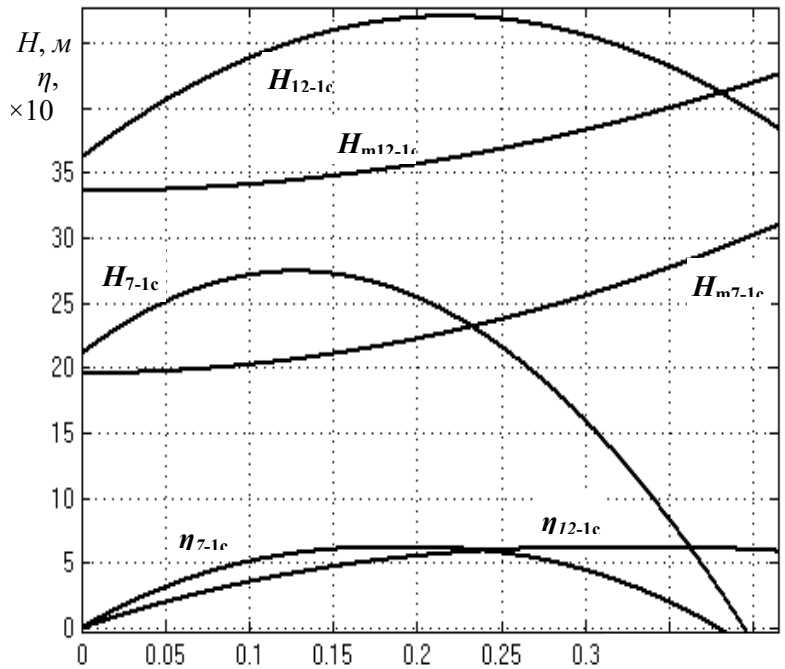


Рис. 2

Дослідження ефективності

ЕМС водопостачання 12 поверхового будинку із двома стояками, відповідно для 1...6 і 7...12 поверхів, виконаємо із скорегованою математичною моделлю. Модельний насос, застосований для дослідження 12 поверхового будинку з єдиним стояком, замінимо еквівалентним, який обладнаний двома парами з чотирьох однакових робочих коліс: колеса кожної пари гідравлічно з'єднано послідовно, пари з'єднано у паралель. У такому випадку, характеристики даних коліс можна отримати після зміни величин напорів і подач у вихідних даних (3) насосу К-20/30 з коефіцієнтом $12/7/2=6/7$. За вказаного з'єднання коліс їхня результуюча характеристика є еквівалентною попередній характеристиці.

Вираз еквівалентної витратної характеристики гідравлічної мережі меншого стояку можна отримати з (2) за умови: $k = 6$; $H_{st6} = \sum_{i=1}^k h_i$; $k_{R1} = 1$, а для більшого: $k = 6$; $k_{R1} = 7$; $H_{st12} = 2 \sum_{i=1}^k h_i$.

Потрібний робочий режим нагнітання води до більшого стояку забезпечить пара послідовно з'єднаних вказаних коліс насосу. Для роботи меншого стояку достатньо одного колеса. Таким чином, для забезпечення системи з двома стояками достатньо лише трьох вказаних коліс. При цьому гідравлічна схема насосу, який обслуговує обидва стояки, складається з двох паралельних потоків: перший – з двох коліс з їхнім послідовним з'єднанням, другий – з одного колеса. Насос має один вхід і два виходи. Вихід першого потоку з'єднано із більшим стояком, другого – із меншим. Всі колеса розміщено на одному валу. Для приводу насосу застосуємо такий же двигун – 4A112M2У3. Розрахункові напірні характеристики потоків насосу, залежності їхніх ККД, еквівалентні витратні характеристики мереж стояків для обох варіантів водопостачання 12 поверхового будинку наведено на рис. 3.

Вираз потужності збільшення потенційної енергії води, доставленої споживачам меншим стояком за $k=6$, наступний:

$$P_{u.s} = \rho g \frac{Q}{2k} \sum_{i=1}^k h_{sti} = \frac{\rho g Q H_{st6}}{2k^2} \sum_{i=1}^k i = \rho g Q H_{st} 0,25(0,5 + 0,5/k), \quad (9)$$

де $H_{st6} = 0,5H_{st12} = 0,5H_{st}$ – співвідношення статичних напорів за зміни етажності.

Вираз потужності збільшення потенційної енергії води, доставленої споживачам більшим стояком за $k=6$, наступний:

$$P_{u.b} = \rho g \frac{Q}{2k} \sum_{i=1}^k (h_{sti} + kh_i) = \frac{\rho g Q H_{st6}}{2k^2} \sum_{i=1}^k (i + k) = \rho g Q H_{st} 0,25(0,5 + 0,5/k + 1). \quad (10)$$

Сумарна потужність збільшення потенційної енергії води обома стояками

$$P_{u.b} + P_{u.s} = \rho g Q H_{st} 0,25(1 + 1/k + 1) = \rho g Q H_{st} 0,5(1 + 0,5/k). \quad (11)$$

Співставлення потужності корисної дії ЕМС водопостачання у разі єдиного стояка (4) і при двох стояках (11) показує, що ці величини є рівними, враховуючи, що у (4) $k=12$, а у (11) $k=6$.

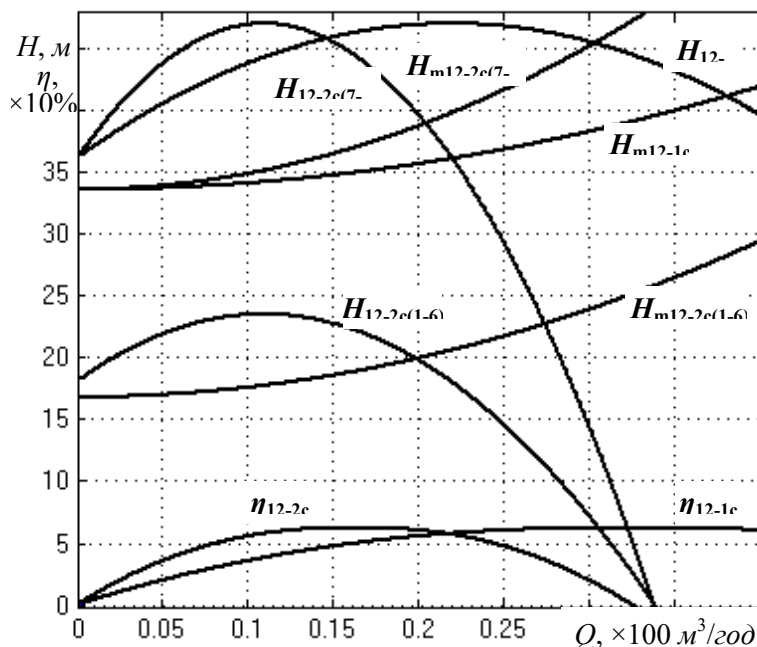


Рис. 3

Математична модель дослідження енергоефективності процесів водопостачання 12-ти поверхового будинку відрізняється від моделі рис. 1 параметрами моделі АД, гідравлічної мережі і насоса. Під час дослідження системи з єдиним стояком, як сказано раніше, характеристики насоса відповідають (3) із збільшенням величин напорів і подач у вихідних даних з коефіцієнтом 12/7. Для випадку двох стояків даний коефіцієнт дорівнює 6/7, на вхід блоку насоса подається сигнал про половину подачі, визначення потужності на валу АД здійснюється за цією половинною подачею і потроєним значенням напору з виходу блоку насоса (оскільки працює три колеса з половинною подачею). Коефіцієнт енергоефективності визначається за виразом (5) з урахуванням параметрів заданої циклограми водоспоживання. У разі двох стояків його величина

становить $Keef = 0,2206$. Тобто, відповідно до виконаного дослідження, застосування системи водопостачання із двома стояками за їхньої диференціації за висотою підйому **збільшує енергоефективність на 30 %**.

Визначення величини коефіцієнту енергоефективності насосного агрегату здійснено з урахуванням вказаної адаптації моделі рис. 1 до системи з дворівневими стояками. При цьому враховано, що насос складається з двох потоків з однаковою подачею і трьох однакових коліс з однаковим напором (внаслідок рівності подачі). За даних умов (за заданою інформацією про подачу, розрахованими даними про робочий напір колеса насоса) для системи з двома стояками величини коефіцієнтів енергоефективності насосного агрегату і АД можна визначити подібно до (6) та (7)

$$Keef_{PU} = 1,5 \rho g \frac{\sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}; \quad (12)$$

$$Keef_M = 1,5 \rho g \frac{\sum_{j=1}^J \frac{Q_j H_j}{\eta_j} T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}. \quad (13)$$

Відносна економія енергоспоживання у разі застосування ідеальної системи регулювання із зведенням напорів потоків насосу до мінімально допустимих втрат напорів у мережах стояків може бути оцінена, з урахуванням співвідношення потужностей потоків, за виразом

$$\Delta W'_{\Delta H} = \sum_{j=1}^J Q_j (3H_j - H_{msj} - H_{mbj}) T_j / 3 \sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j, \quad (14)$$

де H_{ms}, H_{mb} – втрати напору у мережі меншого і більшого стояків відповідно до (2) за половинної подачі з урахуванням, що $R = 0,000835 \text{ год}^2/\text{м}^5$; $k = 6$; $H_{st.s} = 6h_i$; $H_{st.b} = 12h_i$; $k_{R1.s} = 1$; $k_{R1.b} = 7$.

Результати порівняльного дослідження ЕМС водопостачання будинків зведено до таблиці. Перша строчка відноситься до 7, а друга – 12 поверхового будинків з єдиним стояком. Третя – до 12 поверхового будинку з двома стояками. Параметри поверхів однакові, $R = 0,000835 \text{ год}^2/\text{м}^5$. Шостий стовпчик вказує на величину зведеного гідравлічного опору мережі за (2) у відносних одиницях до опору ділянки стояку одного поверху R . Сьомий – оцінює корисну дію системи за виразами (4), (10), (11) порівняно з одноадресною подачею води на останній поверх.

Кількість поверхів, стояків	k	H_{st}	$\frac{Q}{Q_{\Sigma}}$	k_{R1}	$k_{Rk} + \frac{\sum_{i=2}^{k-1} (k+1-i)^2}{k^2}$	$\frac{P_u}{\rho g Q H_{st}}$	$K_{\text{еefPU}}$	$K_{\text{еefM}}$	$\Delta W'_{\Delta H}$	$K_{\text{еef}}$	%
7	7	$7 h_i$	1	1	7,939	0,571	0,418	0,844	0,203	0,1761	103,8
12-1с	12	$12 h_i$	1	1	6,243	0,542	0,432	0,872	0,195	0,1697	100
12-2с	1-6	$6 h_i$	0,5	1	8,333	0,146	0,425	0,859	0,23	0,2206	130
	7-12	$12 h_i$	0,5	7	14,333	0,396					

У передостанньому стовпчику таблиці наведено величини коефіцієнтів енергетичної ефективності системи. Ця ж інформація у останньому стовпчику надана у відсотках до показника 12 поверхового будинку із одним стояком. Результати показують, що у разі застосування нерегульованого електроприводу насосу для системи із двома стояками витрати електроенергії можна знизити на 30 %. Регульований електропривод може знизити витрати енергії ще на рівні 20 %. Збільшення енергетичної ефективності системи із двома стояками досягається завдяки зменшенню як надлишкових напорів у споживачів нижніх поверхів (реалізується зміною структури системи водопостачання), так і величини втрат у двигуні (обумовлено зміною навантаження АД за зменшення надлишкових напорів). При цьому, як видно з таблиці, енергоефективність насосного агрегату навіть дещо знижується відповідно до зміни ККД АД із зменшенням його завантаження.

Рекомендації з вдосконалення структур насосних агрегатів. Зміну структури системи водопостачання із застосуванням паралельного зонування часто здійснюють із збільшенням кількості насосів і АД меншої потужності [4], що супроводжується зменшенням їхніх ККД. Виконаний аналіз показав, що даного недоліку для багатоповерхових будинків можна позбутися застосуванням спеціалізованої структури насосного агрегату. В цьому випадку гідравлічна схема насосу, який обслуговує два стояки, складається з двох паралельних потоків. Насос має один вхід і окремі виходи для стояків. Всі колеса розміщено на одному валу. Для приводу насосу застосовується двигун на повну потужність системи. Перевагою такої структури, окрім збільшення ККД АД, є збільшення ККД насосу у випадку зустрічного розміщення робочих коліс потоків для компенсації осьового зусилля, зменшення втрат у підшипниках і об'ємних втрат.

Висновки. За результатами комплексного порівняльного дослідження ЕМС водопостачання багатоповерхового будинку визначено, що застосування дворівневих стояків замість одного стояку дає можливість підвищити енергетичну ефективність на 30 % завдяки зменшенню надлишкових напорів у системі і втрат у двигуні. Крім того, застосування регульованого електроприводу може підвищити енергетичну ефективність ЕМС ще на 20 %. Застосування спеціалізованого насосного агрегату системи з дворівневими стояками забезпечує підвищення енергоефективності внаслідок зниження втрат як у двигуні, так і насосі. Розроблена комплексна математична модель ЕМС водопостачання багатоповерхового будинку із дворівневими стояками забезпечує потреби порівняльних оптимізаційних досліджень різних структур системи за варіювання кількістю поверхів і режиму водоспоживання.

Роботу виконано за держбюджетною темою “Наукові засади та засоби комплексного проектного синтезу асинхронних машин енергоефективних і ресурсозберігаючих електромеханічних систем” (шифр «АСЕЛМА-К»). Державний реєстраційний номер 0117U007715, КПКВК 6541030.

1 Yang Zhou, Eric Wai Ming Lee, Ling-Tim Wong, Kwok-Wai Mui. Modeling Study of Design Flow Rates for Cascade Water Supply Systems in Residential Skyscrapers. *Water*. 2019. Vol. 11(12). 2580. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122580>.

2 Alexandre Magno Ferreira Diniz, Cristiano Horade Oliveira Fontes, Caiuby Alves Da Costa, Gloria Meyberg Nunes Costa. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. *Energy Efficiency*. 2015. No 8. Pp. 417-432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9292-4>

3 Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.

4 Huong N., Anh N., Huyen D., Son T., Cuong D. Optimization to water supply system design and operation scheme in high rise buildings. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. 2018. Vol. 12. No 3. Pp. 123-131. DOI: [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12\(3\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12(3)-12)

5 Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>

6 Попович О.М., Головань І.В. Засоби комплексного проектування для вдосконалення електромеханічних систем з асинхронними двигунами. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>

7 Бібік О.В. Вентильно-індукторний привод насосної установки багатоповерхового будинку. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 38-45.

8 Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. О.: Наука и техника, 2006. 320 с.

9 Лисенко В.П. Економічний критерій вибору стратегії керування біотехнологічними об'єктами. *Біоресурси і природокористування*. 2014. Т. 6. № 3/4. С. 174-179.

10 Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

11 Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К., Морозкин В.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980. 496 с.

12 Радин В.И., Лондин Й., Розенкноп В.Д., Сорокер Т.Г., Сливински Т., Кашински Л., Овчарова М., Гиншт Р., Пальян Т., Каплин А.И., Леман Х., Муштер Ф., Вольф Ю., Бабетич З., Шевчик Л., Ковнацки К., Кравчик А.Э., Малыхин Е.И., Алиханян К.А., Спасов В., Загорский А.Е., Кребер Д., Шельмеци Д., Гусельников Э.М., Макаров Ф.К. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

STUDY OF THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRO-MECHANICAL WATER SUPPLY SYSTEM OF A MULTI-STOREY BUILDING WITH TWO-LEVEL RISERS

O.M. Popovych¹, R.V. Yashyn²

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: popovich1955@ukr.net.

²National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The influence of the structure of the electromechanical water supply system of a multi - storey building on its energy efficiency is investigated. A quantitative estimate of the reduction in the efficiency of the system compared to the supply of water to the top floor, depending on the number of floors. A complex mathematical model of the system with one and two risers (asynchronous motor - pump - branched hydraulic network) with determination of parameters of operating modes taking into account the mutual influence of system components is developed. The value of the system efficiency criterion as the ratio of the potential energy of water at the consumer to the consumed energy is substantiated and quantified. The electromechanical water supply system of a multi-storey building with two levels of risers consumes 30% less energy than the system with a single riser, due to the reduction of the amount of excess pressure in consumers of lower floors. References 12, figures 3, table 1.

Keywords: asynchronous motor, water supply system, multi-storey building, energy efficiency.

- 1 Yang Zhou, Eric Wai Ming Lee, Ling-Tim Wong, Kwok-Wai Mui. Modeling Study of Design Flow Rates for Cascade Water Supply Systems in Residential Skyscrapers. *Water*. 2019. Vol. 11(12). 2580. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122580>
- 2 Alexandre Magno Ferreira Diniz, Cristiano Horade Oliveira Fontes, Caiuby Alves Da Costa, Gloria Meyberg Nunes Costa. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. *Energy Efficiency*. 2015. No 8. Pp. 417-432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9292-4>
- 3 Leznov B.S. Frequency-controlled electric drive of pumping units. Moskva: Mashinostroenie, 2013. 176 p. (Rus)
- 4 Huong N., Anh N., Huyen D., Son T., Cuong D. Optimization to water supply system design and operation scheme in high rise buildings. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. 2018. Vol. 12. No 3. Pp. 123-131. DOI: [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12\(3\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12(3)-12)
- 5 Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Power effective modes electromechanical system of pump installation of the multi-storey building. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 38-45. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>
- 6 Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>
- 7 Bibik O.V. Switched-reluctance drive of pump installation of the multi-storey building. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. Vyp. 45. Pp. 38-45. (Ukr).
- 8 Petrushin V.S. Asynchronous motors in an adjustable electric drive. Odessa: Nauka i tekhnika, 2006. 320 p. (Rus)
- 9 Lisenko V.P. Economic criterion for the choice of strategy for supporting biotechnological objects. *Bioresursy i pryrodokorystuvannia*. 2014. Vol. 6. No 3/4. Pp. 174-179. (Ukr).
- 10 Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. Asynchronous motors series 4A. Moskva: Energoizdat, 1982. 504 p. (Rus)
- 11 Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klokov B.K., Morozkin V.P. Design of electrical machines. Moskva: Energiia, 1980. 496 p. (Rus)
- 12 Radin V.I., Londin J., Rosenknop V.D., Soroker T.G., Slivinski T., Kashinski L., Ovcharova M., Ginsht R., Palyan T., Kaplin A.I., Leman H., Mushter F., Wolf Y., Babetich Z., Shevchik L., Kovnacki K., Kravchik A.E., Malykhin E.I., Alikhanyan K.A., Spasov V., Zagorsky A.E., Kreber D., Shelmeti D., Guselnikov E.M., Makarov F.K. Interelectro unified series of asynchronous motors. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 416 p. (Rus)

Надійшла 13.06.2022
Остаточний варіант 12.09.2022