

УДК 621.65.05

В.Г. Неня, канд. техн. наук, доц., **Л.В. Гапич**, аспірант,
С.О. Хованський, канд. техн. наук,
Сумський державний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГРУПИ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ НАСОСІВ НА МЕРЕЖУ ЗІ ЗМІННИМ ОПОРОМ У ЧАСІ

Розглядається формалізована модель аналізу забезпечення нерівномірного в часі водоспоживання за рахунок роботи групи паралельно працюючих насосів. Для підвищення енергетичної ефективності системи подачі та розподілу води пропонуються комбіновані режими роботи групи нерегульованих насосних агрегатів і регульованого насоса (шляхом зміни частоти обертання ротора).

Ключові слова: насосна станція, паралельна робота насосних агрегатів, формалізована математична модель, упорядкована діаграма, комбіноване регулювання, енергоефективність.

Проблема і її зв'язок з науковими та практичними задачами. У зв'язку з інтенсифікацією розвитку систем водопостачання та каналізації зростає необхідність підвищення ефективності роботи систем подачі та розподілу води й розробки ефективних систем регулювання параметрів насосних станцій відповідно до режимів водоспоживання. Згідно з висновками «Еуґоритр» щодо питань енергозабезпечення в насособудуванні, основний резерв енергозбереження полягає в узгодженні спільної роботи системи «насосний агрегат-мережа» [1].

Аналіз досліджень та публікацій. Роботу насосних станцій прийнято оцінювати наступними показниками [2-5]:

- 1) питомі капіталовкладення на $1 \text{ м}^3/\text{с}$ подачі;
- 2) щорічні експлуатаційні витрати на $1 \text{ м}^3/\text{с}$ подачі;
- 3) вартість 1 м^3 поданої води;
- 4) коефіцієнт використання встановленої потужності;
- 5) коефіцієнт корисної дії насосної станції.

Всі показники, крім першого, прямо або опосередковано пов'язані із коефіцієнтом корисної дії насосної станції. Тому забезпечуючи його максимум, можливо впливати на всі інші показники і гарантувати їх мінімальне або максимальне значення при всіх інших рівних умовах. Постачання води для житлово-комунального господарства характеризується перш за все нерівномірністю: споживачі використовують різні об'єми води шляхом зміни опору запірної та регулюючої арматури. Нормативні документи [6] передбачають подаван-

ня води споживачу з деяким мінімально допустимим напором H_p для забезпечення комфортних умов. Забезпечення більшого значення напору слід вважати недоцільним, оскільки це призводить до завідомо завищених показників енергоємності, тому дане значення буде підтримуватися на сталому рівні. Для оцінки системи зі змінним опором у часі доцільно використовувати деякий середньо виважений питомий показник, на роль якого найбільше підходить середньоексплуатаційний ККД:

$$\eta_T = \frac{E_K}{E_Z} = \frac{E_K}{E_{Z1} + E_{Z2}} = \frac{\int_0^T \rho g H_p Q(t) dt}{k \int_0^T \rho g H_p \frac{Q_m}{\eta_m} dt + \int_0^T \rho g H_p \frac{Q_n(t)}{\eta_n(t)} dt} \quad (1)$$

де E_K – корисна енергія потоку рідини,
 E_Z – витрачена енергія для створення потоку,
 E_{Z1} – витрачена енергія звичайними насосами,
 E_{Z2} – витрачена енергія насосом, в якому змінюється частота обертання,

T – період осереднення, $T = 24$ год,

ρ – густина рідини, $\rho = 1000$ кг/м³,

g – прискорення сили тяжіння, $g = 9,81$ м/с²,

$Q(t)$ – змінна у часі витрата рідини,

Q_m, η_m – подача та ККД насоса, параметри якого не змінюються;

k – кількість таких насосів,

Q_n, η_n – подача та ККД насоса, параметри якого змінююся частотою обертання ротора.

У принциповому відношенні всі параметри, які входять у формулу (1), знаходяться за відомими методиками, які передбачають знаходження сумісної точки характеристик насосної станції та гідравлічної мережі. Традиційно, наприклад у роботі [5], вважається, що формальний розв'язок такої задачі ускладнюється її нелінійністю, що призводить до використання графоаналітичних методів розв'язку. Графоаналітичний метод зручний для традиційного дослідження і зовсім непридатний для автоматизації моделювання за допомогою засобів обчислюваної техніки.

В роботах [7-9] застосовується аналітичний опис характеристик насосів параболою другого ступеня. Цей метод довів свою працездатність, і це дає підстави для його застосування.

Постановка задачі. Розробити формалізовану математичну модель роботи групи нерегульованих насосних агрегатів і регульованого насоса (шляхом зміни частоти обертання його ротора), що працюють на гідравлічну мережу зі змінним опором у часі для підвищення енергетичної ефективності системи подачі та розподілу води.

Викладення матеріалу та результати.

Насос і зовнішня гідравлічна мережа утворюють єдину систему, рівноважний стан якої визначається матеріальним і енергетичним балансом. Матеріальний баланс забезпечується умовою рівності подачі насоса витраті у зовнішній мережі, енергетичний – рівністю напору насоса напору, спожитому мережею.

На рисунку 1 представлена розрахункова схема спільної роботи групи паралельно працюючих насосів на зовнішню гідравлічну мережу. Насосні агрегати, що не регулюються ($H = F_1(Q)$), позначені індексами $1, 2, \dots, k$. Насосний агрегат, що регулюється шляхом зміни частоти обертів ротора ($H = F_2(Q, n)$), позначений індексом n . Регулювання параметрів на виході з насосної установки здійснюється або зміною частоти обертів ротора регульованого насоса, або зміною кількості одночасно працюючих нерегульованих насосів. Однакові параметри на виході з насосної станції можна отримати двома запропонованими способами регулювання або їх комбінацією.

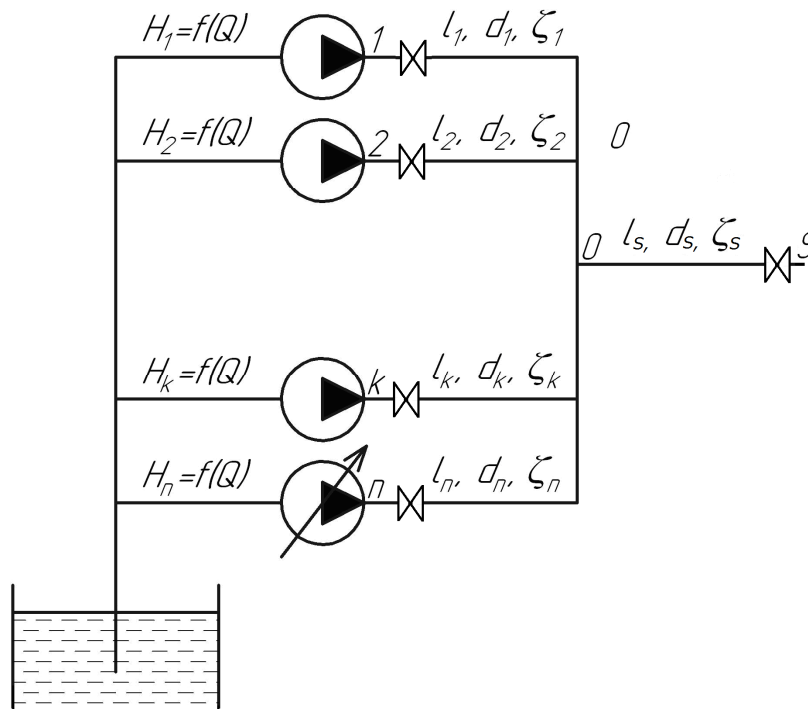


Рис. 1. Розрахункова схема насосної станції з паралельно підключеними насосами.

Характеристики насосних агрегатів апроксимуємо залежностями [9, 10]:

$$\begin{aligned} H_1(Q_1) &= a_{H1} + c_{H1} \cdot Q_1^2, \\ H_2(Q_2) &= a_{H2} + c_{H2} \cdot Q_2^2, \\ H_k(Q_k) &= a_{Hk} + c_{Hk} \cdot Q_k^2, \\ H_n(Q_n, n) &= a_{Hn} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + c_{Hn} Q_n^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Тоді характеристики з урахуванням опорів гілок трубопроводів довжиною l , діаметром d і опорами з сумарним коефіцієнтом опору ζ :

$$H_{1-0}(Q) = H_1(Q) - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4} \cdot Q_1^2, \quad (3)$$

або у розгорнутому вигляді:

$$H_{1-0}(Q) = a_{H1} + c_{H1} \cdot Q_1^2 - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4} \cdot Q_1^2, \quad (4)$$

що дозволяє остаточно виписати:

$$\begin{aligned} H_{1-0}(Q) &= a_{H1} + \left[c_{H1} - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4} \right] \cdot Q_1^2, \\ H_{2-0}(Q) &= a_{H2} + \left[c_{H2} - \left(\zeta_2 + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_2^4} \right] \cdot Q_2^2, \\ H_{k-0}(Q) &= a_{Hk} + \left[c_{Hk} - \left(\zeta_k + \lambda_k \frac{l_k}{d_k} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_k^4} \right] \cdot Q_k^2, \\ H_{n-0}(Q, n) &= a_{Hn} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 + \left[c_{Hn} - \left(\zeta_n + \lambda_n \frac{l_n}{d_n} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_n^4} \right] Q_n^2. \end{aligned} \quad (5)$$

При паралельному з'єднанні насосних агрегатів при однакових напорах подачі додаються для отримання їх сумарної характеристики. Загальна характеристика гідравлічного комплексу подачі води отримується додаванням характеристик насосної станції та живильного трубопроводу як послідовних елементів. Подачі на кожній із паралельних гілок насосної станції визначаються із (4):

$$Q_1^2 = \frac{H_{1-0}(Q) - a_{H1}}{c_{H1} - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4}}. \quad (6)$$

$$Q_1 = \sqrt{\frac{H_{1-0}(Q) - a_{H1}}{c_{H1} - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4}}},$$

$$Q_k = \sqrt{\frac{H_{k-0}(Q) - a_{Hk}}{c_{Hk} - \left(\zeta_k + \lambda_k \frac{l_k}{d_k} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_k^4}}}, \quad (7)$$

$$Q_n = \sqrt{\frac{H_{k-0}(Q) - a_{Hn} \left(\frac{n_0}{n} \right)^2}{c_{Hn} - \left(\zeta_n + \lambda_n \frac{l_n}{d_n} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_n^4}}}.$$

Тоді за наведеним вище правилом у загальному вигляді:

$$Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k + Q_n, \quad (8)$$

маємо:

$$Q_\Sigma = \sqrt{\frac{H_{1-0}(Q) - a_{H1}}{c_{H1} - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4}}} + \dots + \sqrt{\frac{H_{1-0}(Q) - a_{H1}}{c_{H1} - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4}}} + \dots + \sqrt{\frac{H_{k-0}(Q) - a_{Hk}}{c_{Hk} - \left(\zeta_k + \lambda_k \frac{l_k}{d_k} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_k^4}}} + \dots + \sqrt{\frac{H_{n-0}(Q) - a_{Hn} \left(\frac{n_0}{n} \right)^2}{c_{Hn} - \left(\zeta_n + \lambda_n \frac{l_n}{d_n} \right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_n^4}}}. \quad (9)$$

Для паралельного з'єднання трубопроводів відомою є залежність:

$$H_{1-0}(Q) = H_{2-0}(Q) = \dots = H_{k-0}(Q) = H_{n-0}(Q). \quad (10)$$

Для однакових насосів, якими комплектуються насосні станції, доцільною є однакова апроксимація характеристик, тобто:

$$\begin{aligned} a_{H1} &= a_{H2} = \dots = a_{Hk} = a_{Hn} = a_H, \\ c_{H1} &= c_{H2} = \dots = c_{Hk} = c_{Hn} = c_H. \end{aligned} \quad (11)$$

Тоді для сумарної характеристики насосної станції:

$$Q_{\Sigma} = \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H}{c_H - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1}\right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4}}} + \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H}{c_H - \left(\zeta_1 + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1}\right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_1^4}}} + \dots + \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H}{c_H - \left(\zeta_k + \lambda_k \frac{l_k}{d_k}\right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_k^4}}} + \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H \left(\frac{n_0}{n}\right)^2}{c_H - \left(\zeta_n + \lambda_n \frac{l_n}{d_n}\right) \cdot \frac{8}{g\pi^2 d_n^4}}}. \quad (12)$$

Якщо знехтувати впливом опору трубопроводів в межах насосної станції на її характеристику:

$$Q_{\Sigma} = \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H}{c_H}} + \dots + \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H}{c_H}} + \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H \left(\frac{n_0}{n}\right)^2}{c_H}} \quad (13)$$

Об'єднавши вплив насосів, що не регулюються, характеристику насосної станції представимо у вигляді:

$$Q_{\Sigma} = k \cdot \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H}{c_H}} + \sqrt{\frac{H_0(Q) - a_H \left(\frac{n_0}{n}\right)^2}{c_H}}. \quad (14)$$

Подальші розрахунки будуть базуватися на фактичних даних водоспоживання, отриманих на центральному тепловому пункті № 17 (ЦТП-17) м. Суми по вул. Ковпака 47. Дане ЦТП обслуговує 12 дев'яти поверхових житлових будинків, кількість зареєстрованих абонентів становить 1 463 чол.

Виміри витрати води проводилися за допомогою ультразвукового портативного витратоміра - лічильника "ВЗЛЕТ-ПР" з реєстрацією даних витрат з інтервалом 30 секунд впродовж 5 діб.

На рисунку 2 представлений реальний графік добового водопостачання досліджуваного ЦТП, що демонструє добове коливання споживання питної води.

Оцінку економічності роботи насосної станції з регулюванням по сталому напору виконаємо наступним чином: статистично ймовірні та упорядковані за зростанням подачі насосів режими роботи насосної станції подамо у вигляді діаграми упорядкованої за зростанням

режимів роботи [9]. Для цього скористаємося наступною функціональною залежністю: $Q = 15 \cdot e^{0,08t}$

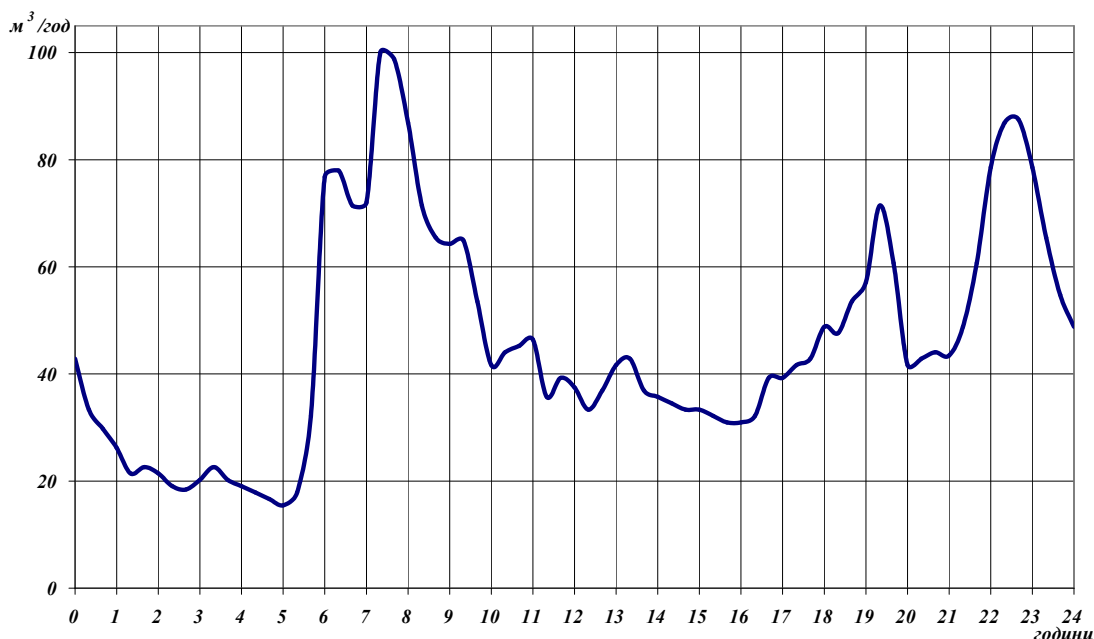


Рис. 2. Графік добового коливання водоспоживання одного з ЦТП м. Суми

Для забезпечення водоспоживання (рис.3) вибираємо насоси типу 1К80-50-200. Для подальшого їх застосування приймаємо $H_0=68$ м, $H_H=58$ м, $Q_H=50$ $\text{м}^3/\text{год}$, $\eta_H=65\%$.

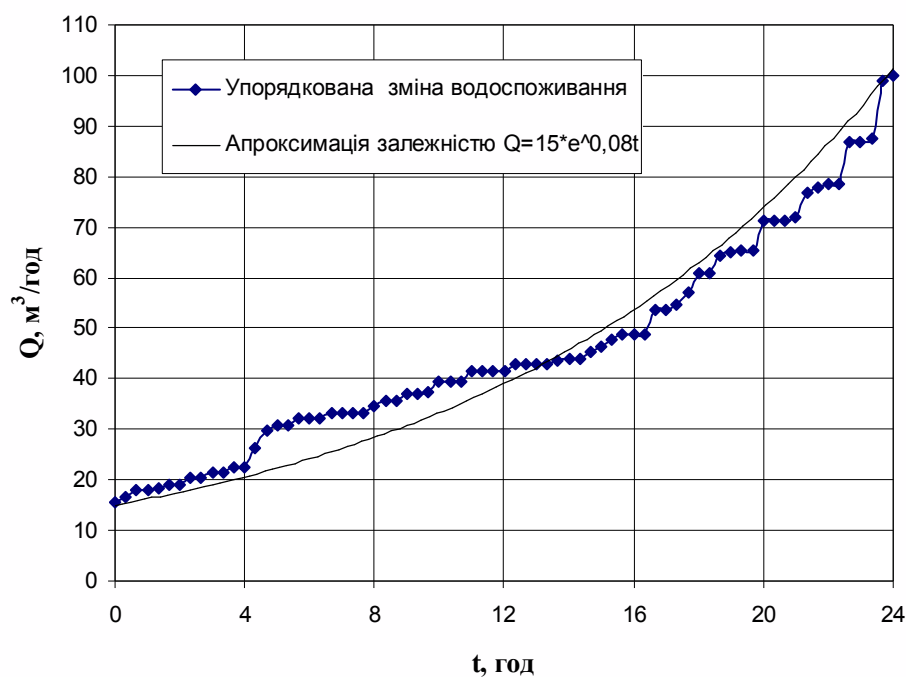


Рис. 3. Діаграма упорядкована за зростанням режимів роботи насосної станції впродовж доби

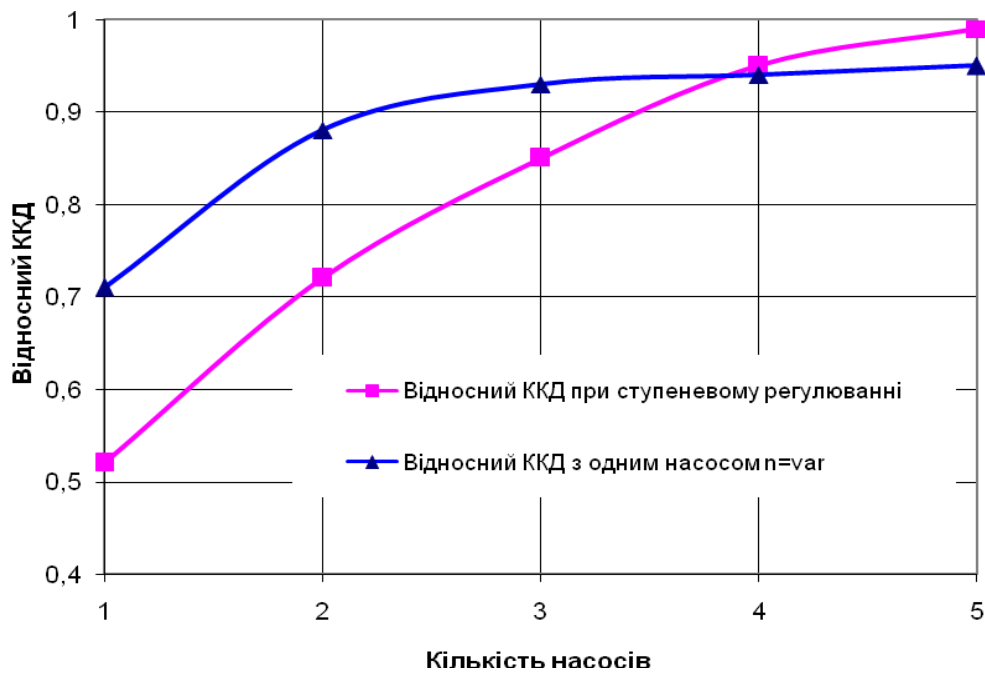


Рис. 4. Залежність відносного ККД від кількості одночасно працюючих насосів: а) при ступеневому регулюванні;
б) при регулюванні з одним насосом $n=var$.

Аналіз рисунка 4 показує, що комбіноване регулювання доцільно застосовувати при кількості насосів до 4, в іншому випадку доцільно застосовувати ступеневе регулювання.

Висновки та напрям подальших досліджень.

1. Запропоновано формалізовану математичну модель роботи групи нерегульованих насосних агрегатів і регульованого насоса (шляхом зміни частоти обертання його ротора), що працюють на гідравлічну мережу зі змінним опором у часі для підвищення енергетичної ефективності системи подачі та розподілу води.

2. Отримано аналітичні залежності для розрахунку характеристики насосної станції, що складається з групи нерегульованих насосних агрегатів і регульованого насоса (шляхом зміни частоти обертання його ротора).

3. Показано, що комбіноване регулювання доцільно застосовувати при кількості насосів до 4, в іншому випадку доцільно застосовувати ступеневе регулювання.

Список літератури

1. Стоимость жизненного цикла насоса (LCC): Руководство по анализу LCC насосных систем. – М.: Изд-во ООО «СофтКом», 2010. – 220 с.
2. Чебаевский В.Ф. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок / В.Ф. Чебаевский, К.П. Вишневикий, Н.Н. Накладов. – М.: Колос, 2000. – 376 с.

3. Якубчик П.П. Насосы и насосные станции: учеб.пособие / П.П.Якубчик. – СПб.: Петерб. гос. ун-т путей сообщ., 1997. – 106[2]. – С. 108 с.
4. Флоринский М.М. Насосы и насосные станции / М.М. Флоринский // М.М.Флоринский, В.В. Рычагов. – М.:Колос, 1967 – 387 с.
5. Карелин В.Я. Насосы и насосные станции / В.Я. Карелин, А.В. Минаев. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
6. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения: СНиП 2.04.02–84; [Действительный от 1985–01–01]. – М.: Госстандарт СССР, 1985 – 204 с. – (межгосударственный стандарт).
7. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник [для машиностроительных вузов] / Т.М. Башта, Б.Б. Некрасов, С.С. Руднев. – М: Машиностроение, 1982 – 423с.
8. Михайлов А.К. Лопастные насосы. Теория, расчет, конструирование / А.К. Михайлов, В.В. Малюшенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 288 с.
9. Хованський С.О. Підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системі водопостачання житлово-комунального господарства: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.17 «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати» / С.О. Хованський. – Суми, 2010. – 21 с.
10. Аналіз частотного регулювання відцентрових насосів водопостачання з метою енергозбереження / В.С. Бойко, В.Г. Неня, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. – № 4/(57). – Ч. 1. – С. 168 – 171.

Стаття надійшла до редколегії 18.11.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Марцинковський

В.Г. Неня, Л.В. Гапич, С.А. Хованский. Исследование работы группы параллельно работающих насосов на сеть с переменным сопротивлением во времени. Рассматривается формализованная модель анализа обеспечения неравномерного во времени водопотребления за счет работы группы параллельно работающих насосов. Для повышения энергетической эффективности системы подачи и распределения воды предлагаются комбинированные режимы работы группы нерегулируемых насосных агрегатов и регулируемого насоса (путем изменения частоты вращения его ротора).

Ключевые слова: насосная станция, параллельная работа насосных агрегатов, формализованная математическая модель, упорядоченная диаграмма, комбинированное регулирование, энергоэффективность.

V. Nenja, L. Gapich, S. Khovanskyu. The Study of Operation of the Pumps Working in Parallel on a Network with Time-Varying Resistance. A formalized model of the analysis of providing time-varying water consumption by operation of the pumps working in parallel is considered in the article. To increase the energy efficiency of water-supply and distribution system combined regimes of operation of the pumps of unregulated pumping units and regulated pump (by changing the speed of its rotor) are offered.

Keywords: pumping station, parallel operation of pumps, formalized mathematical model, ordered diagram, combined regulation, energyefficiency.

© Неня В.Г., Гапич Л.В., Хованський С.О., 2011