https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-26-31

УДК 62-83: 628.12

М. В. Печеник[1]
С. О. Бур'ян[1]
І. В. Худя[1]

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТУРБОМЕХАНІЗМІВ ЗА ВИКОРИСТАННЯ КАСКАДНОЇ СХЕМИ ВКЛЮЧЕННЯ НАСОСІВ

[1]Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

Проведено аналіз режимів роботи системи водопостачання житлового будинку, визначені принципи побудови насосних агрегатів. Розглянута каскадна схема насосної установки з паралельним вмиканням двох відцентрових насосів половинної потужності, один з яких регульований, інший має тільки систему плавного пуску. Оскільки графік споживання води нерівномірний упродовж доби та сезону року, то виникає завдання забезпечення максимально ефективного виконання цього графіка з урахуванням коефіцієнта нерівномірності.

Розроблено три типи графіків добового споживання, відповідно, для літнього, весняного та зимового періодів року.

Запропонована функціональна схема електромеханічної системи двокаскадної насосної установки, яка забезпечує стабілізацію напору. Це дозволяє знизити вірогідність виникнення досить великих динамічних збурень гідравлічної мережі та виключити можливість виходу з ладу запірної арматури та розгерметизацію системи водопостачання житлового будинку. Також забезпечується підтримання напору гідромережі на заданому рівні. За допомогою бібліотеки SimHydraulics пакета прикладних програм MatLab, розроблено модель для дослідження динамічних та статичних режимів роботи каскадної насосної установки. Ця модель дозволяє з високою точністю врахувати характеристики елементів гідромережі (згини, діаметри та довжину трубопроводів, запірну арматуру та ін.) та отримати реальну характеристику зміни її опору в процесі регулювання продуктивності насосної системи. Проаналізовано результати дослідження рівня відпрацювання максимальної динамічної похибки по напору, спричинену зміненням рівня споживання води протягом доби та пори року.

На основі результатів дослідження енергетичних характеристик електромеханічної системи насосного агрегату, з використанням системи стабілізації напору гідравлічної мережі, проаналізовано характер зміни активної і механічної потужності, визначено рівень втрат енергії в статичних режимах роботи. Визначено доцільність використання каскадної схеми насосної установки за наявності системи стабілізації тиску та моделі з урахуванням точних характеристик гідравлічної мережі.

Ключові слова: каскадна схема, гідромережа, насосна установка, графік водоспоживання, система стабілізації, напір, коефіцієнт нерівномірності, втрати енергії, водопостачання.

Вступ

Системи водопостачання широко використовуються як у різних галузях промисловості, так і в побуті, вони повинні відповідати вимогам високої надійності та безпеки їх функціонування. Особлива увага приділяється питанням постачання води в житлові будинки. Оскільки споживання води мешканцями житлових будинків неоднакове протягом доби, а також пори року, то виникає задача максимально ефективного забезпечення графіка споживання за рахунок регулювання продуктивності насосних установок [1]. В цих умовах актуальною є задача стабілізації напору і забезпечення надійного функціонування гідравлічної мережі (відсутність динамічних перевантажень, виходу з ладу запірної арматури тощо).

© М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, І. В. Худя, 2021

Іншою, не менш важливою, задачею є забезпечення високого рівня показників енергетичної ефективності роботи електромеханічних систем насосних агрегатів. Одним з перспективних методів розв'язання цієї задачі є використання каскадної системи побудови насосної станції, яка складається з двох увімкнених паралельно насосів [2], [3]. Разом з тим, суттєвий вплив на результати досліджень електромеханічних систем насосів робить гідравлічна мережа, параметри якої, зазвичай, враховуються з деяким наближенням до реальних. Запропонована модель електромеханічної системи дає можливість врахувати характер зміни її параметрів та отримати реальний характер їх впливу на статичні та динамічні режими роботи систем водопостачання.

Тому, для визначення доцільності використання каскадної схеми включення насосів з системою стабілізації напору та врахування гідросистеми будинку, досить актуальною є задача дослідження динамічних та енергетичних режимів роботи електромеханічної системи насосної установки щодо стабілізації напору в гідромережі.

Метою роботи є дослідження статичних, динамічних та енергетичних характеристик електромеханічної системи двокаскадної насосної установки за використання уточненої моделі гідравлічної мережі, отриманої в середовищі SimHydraulics.

Результати досліджень

Режим роботи насосної установки в основному залежить від зміни режиму споживання води населенням. На етапі виконання проектування будь-якої гідромережі потрібно розрахувати витрати рідини споживачем та необхідного напору. Основним фактором, який потрібно враховувати під час розробки і проектування системи водопостачання міста, району, будинку є добовий графік споживання води. Якісне постачання води забезпечуватиметься, якщо процес подачі води та її споживання динамічно збалансовані.

Методики, які використовуються для побудови математичних моделей режимів водоспоживання базуються на теорії випадкових функцій. Проблемою в застосуванні цих методик є досить складний процес отримання статистичних даних, необхідних для побудови моделей. Для розрахунку системи водопостачання важливе також врахування нерівномірності водоспоживання впродовж доби. Зазвичай вважається, що протягом року коливання водоспоживання відображається весняним, літнім і зимовим графіком. В розрахунках ці коливання оцінюються коефіцієнтом добової нерівномірності: найбільшим K_{max} = 1,1…1,4 та найменшим K_{min} = 0,7…0,9. Ступінчастий графік споживання дванадцятиповерхового будинку для весняного сезону показано на рис. 1 [4]. У цьому випадку для графіка весняного періоду використано коефіцієнт нерівномірності K = 1,4. Графіки для літнього і зимового періоду побудовані аналогічно з графіком на рис. 1, але з урахуванням коефіцієнта добової нерівномірності, для літнього періоду K = 0,8, а для зимового — K = 1.

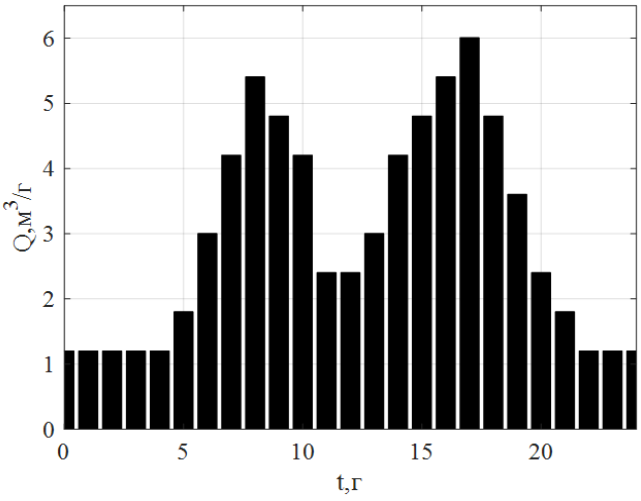

Рис. 1. Графік споживання для весняного періоду

Як випливає з графіка, споживання води є досить нерівномірним, що спричинено режимом життя і трудової діяльності людини. Протягом доби має місце два явно виражені піки водоспоживання. Один пік зранку, зумовлений тим, що люди прокидаються і починають активно використовувати воду для пиття, та гігієнічних процедур, а пік з 16 по 18 годин зумовлений тим, що мешканці будинку повертаються з роботи, школи і також активно починають використовувати воду в питних та господарських потребах.

Дослідження виконано на базі каскадної схеми включення двох насосів однакової продуктивності, функціональна схема якої показана на рис. 2.

Математична модель електромеханічної системи отримана відомими методами [5], [6]. Для дослідження динамічних та статичних режимів роботи насосної установки на базі бібліотеки SimHydraulics пакета прикладних програм Matlab розроблена модель каскадної насосної установки з урахуванням реальних параметрів гідравлічної мережі. Структурна схема моделі показана на рис. 3.

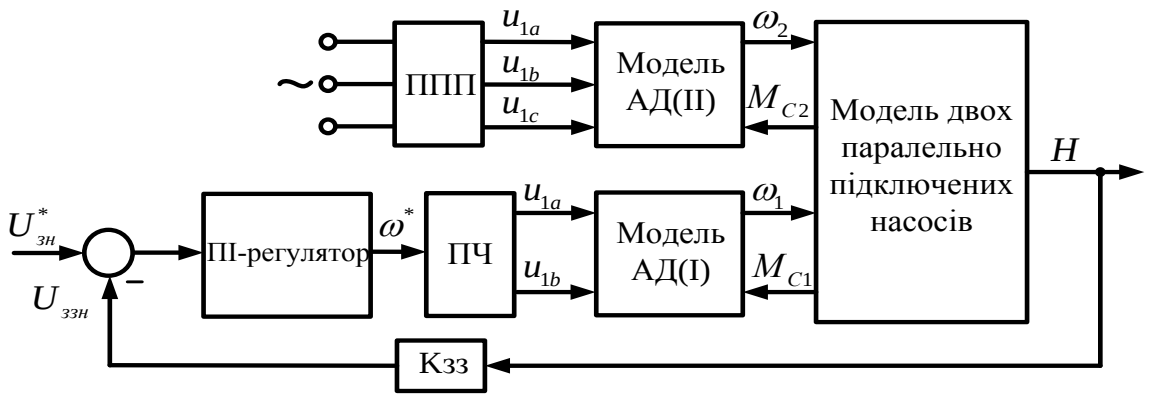

Рис. 2. Функціональна схема каскадної насосної установки: ППП — пристрій плавного пуску; ПЧ — перетворювач частоти $K_{зз}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю; $U^*_{зн}$ — сигнал завдання напору; $U_{ззн}$ — сигнал зворотного зв'язку по напору; ω^* — задана швидкість; ω_1, ω_2 — швидкості першого і другого насосів, відповідно; M_{C1}, M_{C2} — статичний момент на валу першого і другого насосів; АД(I) — регульований електропривід; АД(II) — нерегульований електропривод; u_{1a}, u_{1b} — напруги статора по осях *a* і *b* двофазної моделі АД(I) та АД(II)

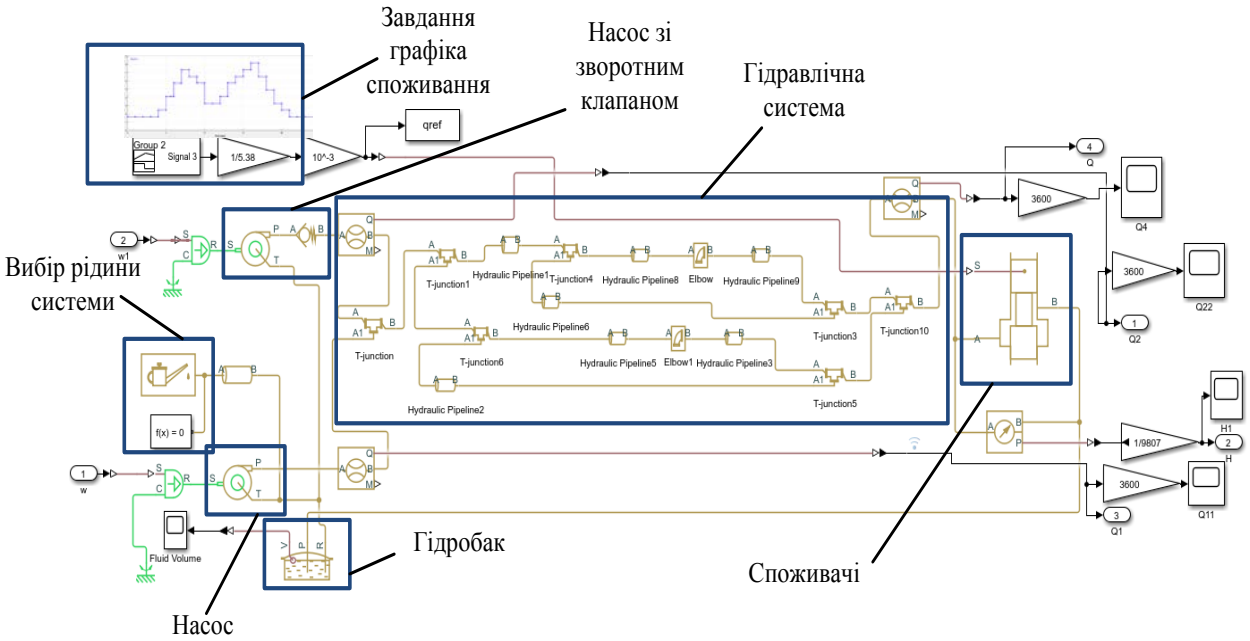

Рис. 3. Структурна схема моделі в середовищі SimHydraulics

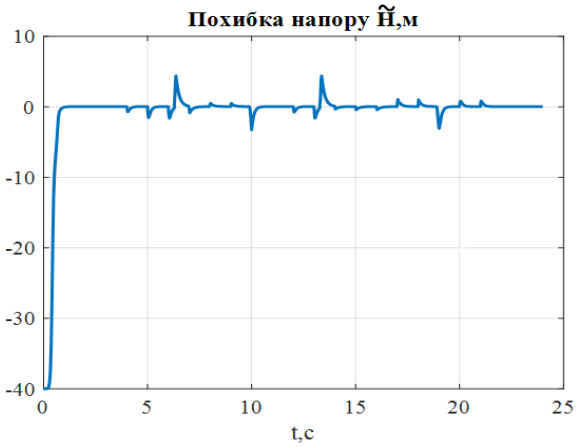

Рис. 4. Похибка за напором при стабілізації тиску насосної установки

Дослідження виконано для системи водопостачання дванадцятиповерхового житлового будинку висотою 36 метрів. В системі використано два однакових насоси фірми Calpeda NMDM 20/140BE потужністю 1,1 кВт та максимальною подачею 3,6 м^3/год для кожного насосного агрегату.

Результати роботи системи стабілізації для добового графіка споживання весняного сезону показано на рис. 4.

Як випливає з графіка стабілізації напору установки, під час виходу системи на усталене значення мають місце досить високі значення разових похибок за напором в моменти часу: 6 с, 10 с, 14 с та 19 с, які зумовлені тим що моделювання проводилося в секундах, а не в годинах для зменшення часу моделювання, і спричинені запуском і зупин-

кою одного з двигунів. В реальних установках ці похибки будуть відсутні, оскільки відбувається плавний запуск і зупинка електродвигунів.

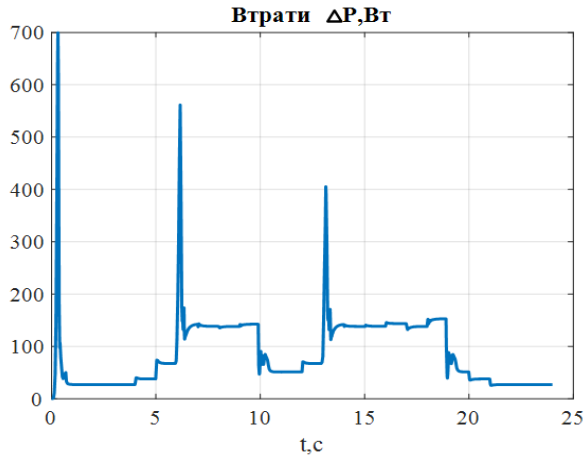

Рис. 5. Величина втрат установки

Зі ступінчастим характером зміни споживання води для весняного періоду максимальна похибка тиску в гідросистемі не перевищує 4 % від заданого значення H = 40 м. Час відпрацювання похибки для встановлення заданого значення напору не перевищує 0,7 с.

Також, використовуючи добові графіки споживання води для кожного сезону, проведено дослідження енергетичних характеристик. На рис. 5 показано характер зміни величини втрат потужності в межах добового графіка споживання для весняного періоду. Як випливає з рис. 5, втрати активної потужності не перевищують 17…28 % від номінального значення. Аналогічні дослідження проведені для літнього і зимнього періодів року. В цілому протягом року амплітуда максимальної похибки по тиску варіюється в межах від 1 % до 4 % від номінальної величини, що відповідає надійним і безпечним умовам роботи гідравлічної мережі. Рівень втрат активної потужності коливається від 13 % до 28 %, що відповідає вимогам до систем водопостачання.

Висновки

Результати досліджень показують, що за використання каскадної схеми насосної установки, електромеханічна система повною мірою забезпечує відпрацювання добового графіка споживання води за умови стабілізації заданого напору. Рівень втрат активної потужності в статичних режимах роботи відповідає достатньому рівню енергетичної ефективності роботи насосного агрегату. Тому під час проектування нових та модернізації наявних систем водопостачання доцільне використання каскадних систем побудови насосних агрегатів.

Для дослідження режимів роботи систем водопостачання з метою точнішого врахування реальних характеристик гідравлічної мережі можна рекомендувати використання розробленої моделі гідравлічної мережі, побудованої на базі бібліотеки SimHydraulics пакета прикладних програм Matlab.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] M. Pechenik, S. Burian, H. Zemlianukhina, and M. Pushkar, “Investigation of the Hydraulic Pressure Stabilization Accuracy in the Conditions of Water Supply Cascade Pump System Operation,” *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 97-100. https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160340.

[2] M. Pechenik, S. Burian, M. Pushkar, and H. Zemlianukhina, “Analysis of the Energy Efficiency of Pressure Stabilization Cascade Pump System,” *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 490-493.

[3] R. Marouani, and M. A. Sellami, “Cascade sliding mode control applied to a photovoltaic water pumping system with maximum power point tracker,” *IEEE Trans. on advanced technologies for signal and image processing*, 2014, pp. 328-333.

[4] P. Skworcow, H. AbdelMeguid, B. Ulanicki, and P. Bounds, “Optimal pump scheduling with pressure control aspects: Case studies” *IEEE Trans. Computing and Control in the Water Industry*, 2010, pp. 113-119.

[5] R. Marino, S. Peresada, and P. Tomei, “ Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 508-515, 1995.

[6] С. О. Бур’ян, М. В. Печеник, Г. Ю. Землянухіна, і А. І. Бабарова, «Дослідження роботи електромеханічної системи автоматизації послідовно з’єднаних насосних установок в пакеті SIMHYDRAULICS,» *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*, вип. 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України,» с. 84-86, 2019.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

Печеник Микола Валентинович — канд. техн. наук, доцент, професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

Бур'ян Сергій Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: sburyan18@gmail.com ;

Худя Ігор Васильович — студент факультету електроенерготехніки та автоматики.

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

M. V. Pechenyk[1]
S. O. Burian[1]
I. V. Khudia[1]

Research of Operating Modes of Turbomechanisms when Using an Inclusion Cascade Pump Switching Scheme

[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

In this article there have been analyzed the modes of operation of the water supply system of a residential building, the principles of construction of pumping units have been defined. The scheme being worked with is the cascade scheme of the pump installation switching on at parallel of two centrifugal pumps of half power, one of which is regulated and another has only system of smooth start. Since the schedule of water consumption is uneven during the day and season of the year, the task is to ensure the most effective coverage of this schedule, taking into account the coefficient of unevenness.

Three types of daily consumption schedules have been developed for the summer, spring and winter periods of the year, respectively.

The functional diagram of the electromechanical system of a two-stage pump installation is given, which provides pressure stabilization. This stabilization reduces the probability of pretty large dynamic disturbances of the hydraulic network and eliminates the possibility of failure of closure ties and depressurization of the water supply system. It is also ensured that the hydraulic pressure is maintained at a given level.

Using the SimHydraulics library of the MatLab application package, a model was developed to study the dynamic and static modes of operation of a cascade pumping unit. This model allows to take into account the characteristics of hydraulic network elements (bends, diameters and length of pipelines, closure ties, etc.) with a high level of accuracy, and to obtain a real characteristic of changes in its resistance in the process of regulating pump system performance. There have been analyzed the results of the study, the nature of the development of the dynamic error of the pressure when changing the level of water consumption during the day and season.

Based on the results of the study of energy characteristics of the electromechanical system of the pump unit when using the system of stabilization of the hydraulic network pressure, the analysis of the nature of changes in active and mechanical power was made and the level of energy loss in static modes was defined. Based on the research results, the expediency of using the cascade scheme of the pump installation in the presence of a pressure stabilization system and a model taking into account the exact characteristics of the hydraulic network was defined.

Keywords: cascade scheme, hydraulic network, pumping station, water consumption schedule, stabilization system, pressure, coefficient of unevenness, energy loss, water supply.

Pechenyk Mykola V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive;

Burian Serhii O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drive; e-mail: sburyan18@gmail.com ;

Khudia Igor V. — Student of the Department of Electrical Engineering and Automation

Н. В. Печеник[1]
С. А. Бурьян[1]
И. В. Худя[1]

Исследование режимов работы турбомеханизмов при использовании каскадной схемы включения насосов

[1]Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Проведен анализ режимов работы системы водоснабжения жилого дома, определены принципы построения насосных агрегатов. Рассмотрена каскадная схема насосной установки при параллельном включении двух центробежных насосов половинной мощности, один из которых регулируемый другой имеет только систему плавного пуска. Поскольку график потребления воды неравномерный в течение суток и сезона года, то возникает задача обеспечения максимально эффективного выполнения этого графика с учетом коэффициента неравномерности.

Разработаны три типа графиков суточного потребления соответственно для летнего, весеннего и зимнего периода года.

Приведена функциональная схема электромеханической системы двухзвенной насосной установки, обеспечивающей стабилизацию напора воды, что позволяет снизить вероятность возникновения достаточно больших динамических возмущений в гидравлической сети и исключить возможность выхода из строя запорной арматуры и разгерметизации системы водоснабжения жилого дома. Также обеспечивается поддержание напора воды в гидросети на заданном уровне. Используя библиотеку SimHydraulics пакета прикладных программ Matlab, разработана модель для исследования динамических и статических режимов работы каскадной насосной установки. Эта модель позволяет с высокой степенью точности учесть характеристики элементов гидросети (сгибы, диаметры и длина трубопроводов, запорную арматуру и др.), и получить реальную характеристику изменения ее сопротивления в процессе регулирования производительности насосной системы. Проанализированы результаты исследования, характера уровня отработки максимальной динамической погрешности по напору при изменении уровня потребления воды на протяжение суток и сезона года.

На основе результатов исследования энергетических характеристик электромеханической системы насосного агрегата при использовании системы стабилизации напора воды в гидросети, проанализирован характер изменения активной и механической мощности, определен уровень потерь энергии в статических режимах работы. Определена целесообразность использования каскадной схемы насосной установки при наличии системы стабилизации давления и модели с учетом точных характеристик гидравлической сети.

Ключевые слова: каскадная схема, гидросеть, насосная установка, график водопотребления, система стабилизации, напор, коэффициент неравномерности, потери энергии, водоснабжение.

Печеник Николай Валентинович — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода;

Бурьян Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: sburyan18@gmail.com ;

Худя Игорь Васильевич — студент факультета электроэнерготехники и автоматики