

УДК 004.94

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.72698

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОДОПОСТАЧАННЯМ З АРТЕЗІАНСЬКИХ СВЕРДЛОВИН У ПЕРЕХІДНОМУ РЕЖИМІ

© К. О. Буравченко

У роботі розглянуто систему керування водопостачанням з артезіанської свердловини у перехідному режимі роботи. Система керування виконує пошук оптимальної за швидкодією траєкторії руху системи водопостачання на основі принципу максимуму з метою найшвидшого повернення у режим стабілізації. Проведено аналіз систем керування водопостачанням з артезіанських свердловин у перехідному режимі роботи та методів їх покращення

Ключові слова: система водопостачання, оптимальна за швидкодією, принцип максимуму, Scada системи, передатна функція

The paper describes an artesian water supply control system in the transition mode. The control system searches for the optimal performance trajectory of the water supply on the basis of a maximum return with a view to the fastest mode of stabilization. The analysis of artesian water supply control systems in transition mode and methods of improvement was conducted

Keywords: water supply system, optimum performance, maximum principle, Scada system, transfer function

1. Вступ

Система водопостачання є розподіленою стохастичною системою, в якій виникають коливальні процеси за рахунок нерівномірного споживання води [1], та на яку значно впливають параметри трубопроводів [2]. При подачі води з артезіанських свердловин безпосередньо у мережу трубопроводів немає необхідності, щоб насоси працювали постійно, так як потреба у воді у користувачів є хаотичною. В сучасних системах керування використовують частотні перетворювачі, які в автоматичному режимі підтримують заданий тиск у трубопроводі. При зменшенні споживання, система може перейти у режим «сну», таким чином зменшити витрати електричної енергії. При виході з такого режиму тиск у трубопроводі може бути істотно меншим ніж заданий, а користувачі можуть недоотримати воду. В такому випадку задачею системи керування є найшвидше повернення у заданий стан. Крім того такі перехідні режими можуть виникати і при одночасному підключенні великої кількості споживачів або потужних споживачів. Актуальною задачею є розробка системи керування водопостачанням з артезіанських свердловин, яка б забезпечила мінімальний час повернення з перехідного режиму у режим стабілізації стану.

2. Аналіз літературних даних

Проблему коливань тиску у трубопроводах автором роботи запропоновано вирішувати за рахунок оптимального розташування засувки з необхідністю регулювання потоками у реальному часі [3, 4]. Розглянута система керування водопостачанням [5, 6]. Показано що мета керування полягає у мінімізації функціоналу ефективності, який відображає економічні та інженерні вимоги. Для вирішення питання побудови системи керування запропоновано використати регулятор зі змінними параметрами та структурою.

Так у роботі [7] показано, що за допомогою Scada системи та вимірювання значень тиску у контрольних точках у реальному часі досягнуто зменшення витрати електричної енергії на 19–27 % за рахунок дискретного керування насосами.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження – процес водопостачання з артезіанських свердловин.

Метою дослідження є визначення оптимального за швидкодією закону керування системи водопостачання з артезіанських свердловин у перехідному режимі.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати *такі задачі*:

– визначити вимоги до сигналу керування для забезпечення оптимального за швидкодією перехідного режиму системи водопостачання з артезіанських свердловин;

– побудувати систему керування, що реалізує задачу оптимального за швидкодією керування системи водопостачання з артезіанських свердловин.

4. Методи дослідження

Методи дослідження, використані в роботі, базуються на положеннях теорії автоматичного керування при дослідженні та аналізі систем керування та теорії оптимального керування. За допомогою теорії оптимального керування в дослідженні визначено вимоги до сигналу керування, який забезпечує оптимальний за швидкодією перехідний режим. Досліджено перехідний режим на оптимальність за допомогою принципу максимуму та функції Гамільтона. Показано, що складність обчислень початкових умов допоміжної системи не завжди дозволяє використовувати дану методику у системах керування системою водопостачання у реальному часі.

5. Результати дослідження

Для дослідження динаміки процесів водопостачання розглянемо передаточну функцію системи водопостачання. До її складу входить насосний агре-

гат та трубопроводи. Насосний агрегат складається з насоса та електродвигуна. Структурна схема системи керування водопостачанням з артезіанських свердловин наведена на рис. 1.

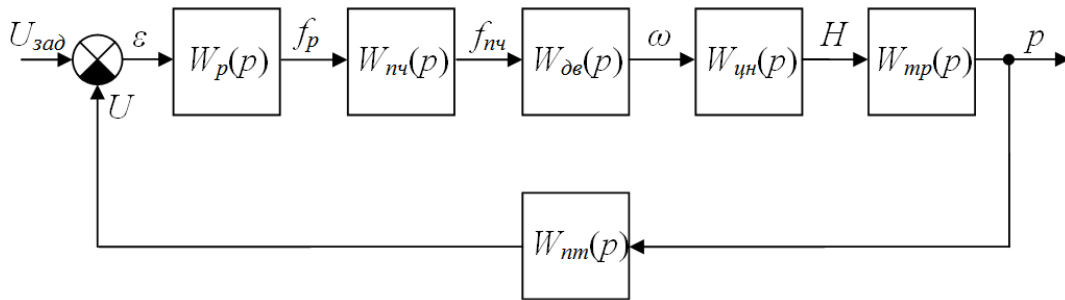


Рис. 1. Структурна схема системи керування водопостачанням з артезіанських свердловин

Передатна функція перетворювача частоти згідно [6] визначається як:

$$W_{nc}(p) = \frac{f_{nc}(p)}{f_p(p)} = \frac{k_{nc}}{(T_{nc}p + 1)}, \quad (1)$$

де T_{nc} – стала часу перетворювача частоти, k_{nc} – коефіцієнт підсилення перетворювача частоти. Передатна функція електричного двигуна згідно [7]

$$W_{дв}(p) = \frac{\omega(p)}{f(p)} = \frac{k_{дв}}{(T_{дв}p + 1)}, \quad (2)$$

де $T_{дв}$ – електромеханічна стала часу електродвигуна, $k_{дв}$ – коефіцієнт підсилення електродвигуна. В свою чергу $T_{дв}$ згідно [8] визначається як:

$$T_{дв} = \frac{J\omega_0}{M_n}, \quad (3)$$

де ω_0 – кутова швидкість ротору при номінальній частоті живлення, M_n – пусковий момент двигуна.

Передатна функція насосного агрегату згідно [9] має вигляд:

$$W_{цн}(p) = \frac{H(p)}{\omega(p)} = \frac{k_{цн}}{(T_{цн}p + 1)}, \quad (4)$$

де H – напір відцентрового насоса, $T_{цн}$ – стала часу відцентрового насоса, $k_{цн}$ – коефіцієнт підсилення відцентрового насоса.

Передатна функція трубопроводу визначається як:

$$W_{мп}(p) = \frac{P(p)}{H(p)} = \frac{k_{мп}}{T_i p + 1}, \quad (5)$$

де: $k_{мп} = \frac{\nu S}{P}$ – коефіцієнт підсилення, $T_i = \frac{\rho l \nu}{P}$ – інерційна стала часу стовбура рідини, ρ – густина рідини, l – довжина трубопроводу, $\nu = \frac{Q}{S}$ – швидкість руху

рідини у трубопроводі, P – тиск на кінці трубопроводу, S – площа поперечного перерізу трубопроводу.

Передатна функція перетворювача тиску являє собою коефіцієнт підсилення $W_{нм}(p) = \frac{U(p)}{P(p)} = k_{нм}$,

де $k_{нм}$ – коефіцієнт підсилення перетворювача тиску, U – вихідна напруга перетворювача, пропорційна сигналу тиску.

Передатна функція системи водопостачання, яка включає в себе насосний агрегат та трубопровід:

$$W(p) = \frac{k_{nc} k_{дв} k_{цн} k_{мп} k_{нм}}{(T_{nc}p + 1)(T_{дв}p + 1)(T_{цн}p + 1)(T_{мп}p + 1)}. \quad (6)$$

Для спрощення дослідження динаміки системи водопостачання з артезіанських свердловин, доцільно зменшити порядок передатної функції, відкинувши передатну функцію перетворювача частоти, перетворювача тиску і трубопроводу. Проведені дослідження показують, що трубопровід можливо замінити на ланку чистого запізнення, яким можна знехтувати для спрощення розрахунків. Тоді спрощена передатна функція системи водопостачання з артезіанських свердловин набуває наступного вигляду:

$$W(p) = \frac{k_{дв} k_{цн}}{(T_{дв}p + 1)(T_{цн}p + 1)}. \quad (7)$$

Отже для моделювання в подальшому можна використовувати передатну функцію (7).

Із передатної функції (7) диференціальне рівняння системи водопостачання з артезіанських свердловин набуває наступного вигляду:

$$T_1 T_2 \ddot{x} + (T_1 + T_2) \dot{x} + x = ku, \quad (8)$$

де T_1 – стала часу електричного двигуна, T_2 – стала часу відцентрового насоса, $k = k_{дв} k_{цн}$ – коефіцієнт підсилення системи водопостачання. Із диференціального рівняння побудуємо систему рівнянь, покладемо $x = x_1$:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{-x_1 - (T_1 + T_2)x_2 + ku}{T_1 T_2}, \quad -1 \leq u \leq 1, \end{cases} \quad (9)$$

Складемо функцію Гамільтона на основі (9)

$$H = \Psi_1 x_2 - \frac{1}{T_1 T_2} \Psi_2 x_1 - \frac{(T_1 + T_2)}{T_1 T_2} \Psi_2 x_2 + \frac{1}{T_1 T_2} k u \Psi_2. \quad (10)$$

Допоміжна система рівнянь, яка задовольняє умові принципу максимуму тоді:

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = \frac{1}{T_1 T_2} \Psi_2, \\ \dot{\Psi}_2 = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = -\Psi_1 + \frac{(T_1 + T_2)}{T_1 T_2} \Psi_2, \end{cases} \quad (11)$$

$u^* = -\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{1}{T_1 T_2} k u \Psi_2$ – оптимальний сигнал керування. Функція H досягає максимуму, при $-1 \leq u \leq 1$ в залежності від знака Ψ_2 :

$$u^* = -\text{sign} \Psi_2. \quad (12)$$

Із розглянутого видно, що для забезпечення оптимального перехідного процесу по швидкодії для системи водопостачання другого порядку необхідно, щоб сигнал керування $u(t)$ приймав значення ± 1 і за теоремою перемикачів [10] мав не більше одного перемикачів.

Вибір початкових умов для сполученої системи диференціальних рівнянь

Для практичних задач побудови систем керування водопостачанням з артезіанських свердловин розроблений математичний апарат принципу максимуму є не зовсім прийнятним так як вимагає великої обчислювальної потужності, і не завжди може

бути застосований у системах реального часу. Складність обчислень вимагає шукати інші способи побудови оптимального сигналу керування. Запропоновано реалізувати автомат, який би в залежності від вектору координат системи водопостачання $X(t)$ та сполученої системи $\Psi(t)$ та на основі функції H створював би оптимальне керування. Головна задача слідкувати за зміною H значення та визначати момент перемикачів в залежності від її поведінки. Проведені дослідження показують, що у реальних умовах інформація про тиск у системі водопостачання та динаміка його зміни дозволяє побудувати функцію Гамільтона та на її основі забезпечити оптимальний за швидкодією план роботи у перехідному режимі не виконуючи складних чисельних обчислень, а отримувати зміну з знаку керування $u(t)$ автоматично.

Приклад.

Для виконання моделювання на основі табличних даних обрано насосний агрегат, який має наступні параметри:

- $T_{em}=0.026$ – електромеханічна стала часу асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором;
- $T_n=0.231$ – стала часу насосу;
- $k_{em}=5.061$ – коефіцієнт підсилення двигуна;
- $k_n=5.22$ – коефіцієнт підсилення насосу.
- $T_1=T_{em}T_n=0.006006$,
- $T_2=T_{em}+T_n=0.257$, $k=k_{em}k_n=26.41842$.

На основі методу знаходження моменту перемикачів для системи другого порядку наведеного у розділі три отримано момент перемикачів $t_1=0.0207$ с та момент коли необхідно зняти керування $t_2=-0.0311$ с. За допомогою пакету прикладних програм проведено моделювання системи з використанням таймеру, часового реле та об'єкту. Структурна схема моделі представлена на рис. 2.

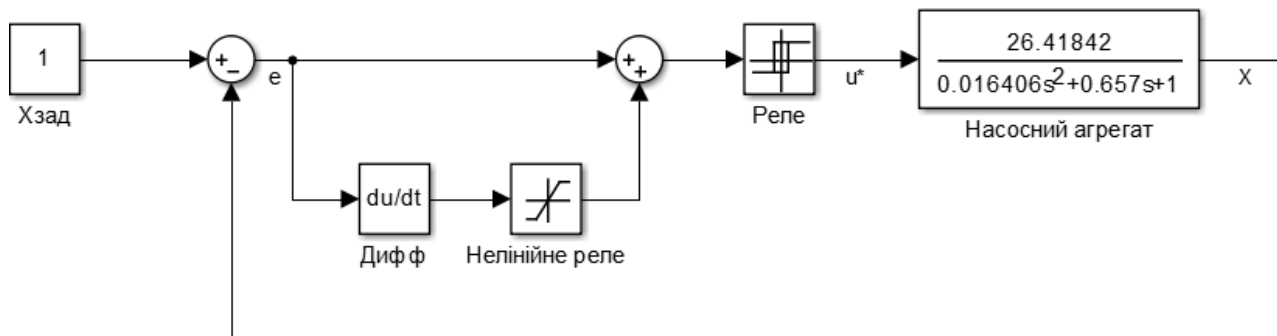


Рис. 2. Структурна схема системи керування

Перевірка траєкторії руху системи на оптимальність по швидкодії.

Для підтвердження оптимальності траєкторії руху системи водопостачання з артезіанських свердловин проведемо моделювання функції Гамільтона і

покажемо її сталість. Використовуючи передатну функцію системи водопостачання (7) та алгоритм наведений на рис. 3. Перевіримо траєкторію руху системи водопостачання з артезіанських свердловин на оптимальність.

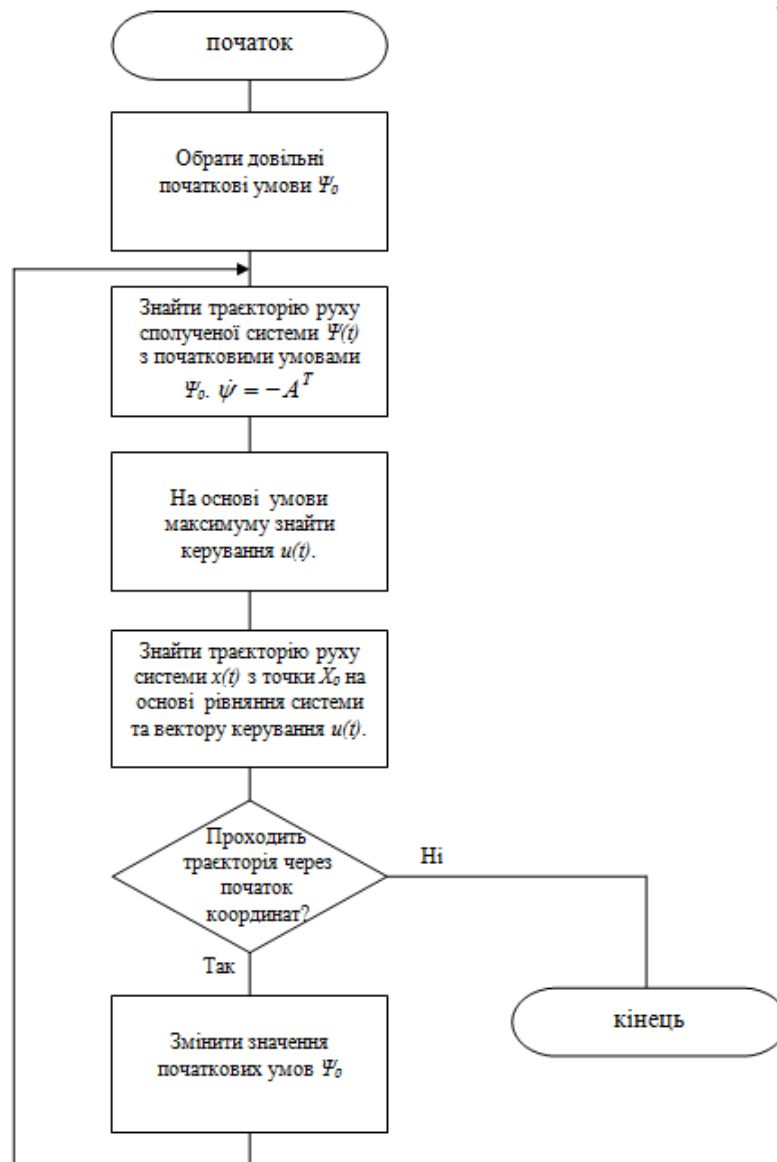


Рис. 3. Алгоритм вирішення задачі максимізації

Для вирішення задачі максимізації функції Гамільтона необхідно знайти такі початкові умови Ψ_0 , при яких ψ_2 змінює знак один раз, а траєкторія руху основної системи потрапляє у задану точку X_0 за мінімальний час. Змінюючи початкові умови можна побудувати безліч траєкторій руху, але лише одна з них пройде через точку X_0 , що доведено за допомогою теореми існування [10]. Для знаходження Ψ_0 необхідно вирішити крайову задачу одним із чисельних методів. На основі вирішення крайової задачі за методом Монте-Карло виявлено початкові умови для допоміжної системи: $\psi_{10} = -68.758$, $\psi_{20} = -0.959$, що задовольняють умові максимуму. При кінцевому заданні $x_{10} = 1$, $x_{20} = 0$ побудуємо траєкторію руху основної та допоміжної системи, а також функцію Гамільтона. Рішенням основної та допоміжної системи є

$$\begin{cases} x_1 = ku - C_3 T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + C_4 T_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \\ x_2 = C_3 e^{-\frac{t}{T_1}} + C_4 e^{-\frac{t}{T_2}} \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \psi_1 = \frac{C_1 T_1 e^{\frac{t}{T_1}} + C_2 T_2 e^{\frac{t}{T_2}}}{T_1 T_2} \\ \psi_2 = C_1 e^{\frac{t}{T_1}} + C_2 e^{\frac{t}{T_2}} \end{cases}. \quad (14)$$

На основі початкових умов у момент $t_0 = 0$ визначимо константи інтегрування

$$C_4 = \frac{x_{10} - u_{10}k + x_{20}}{T_1 - T_2}, \quad C_3 = x_{20} - C_4,$$

$$C_2 = \frac{x_{10} - u_{10}k + x_{20}}{T_1 - T_2}, \quad C_1 = x_{20} - C_4$$

Графіки побудованих траєкторій руху наведено на рис. 4.

Функція Гамільтона досягає максимуму для різних інтервалів керування і змінює свій знак лише в момент перемикавання сигналу u (рис. 5).

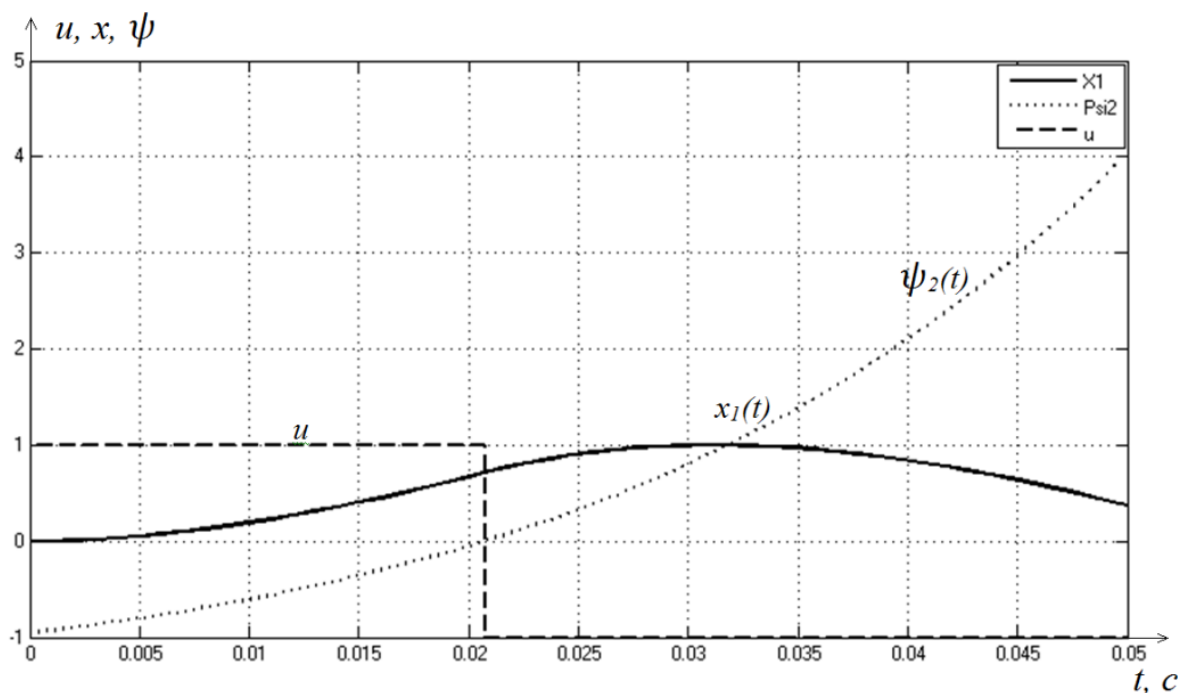
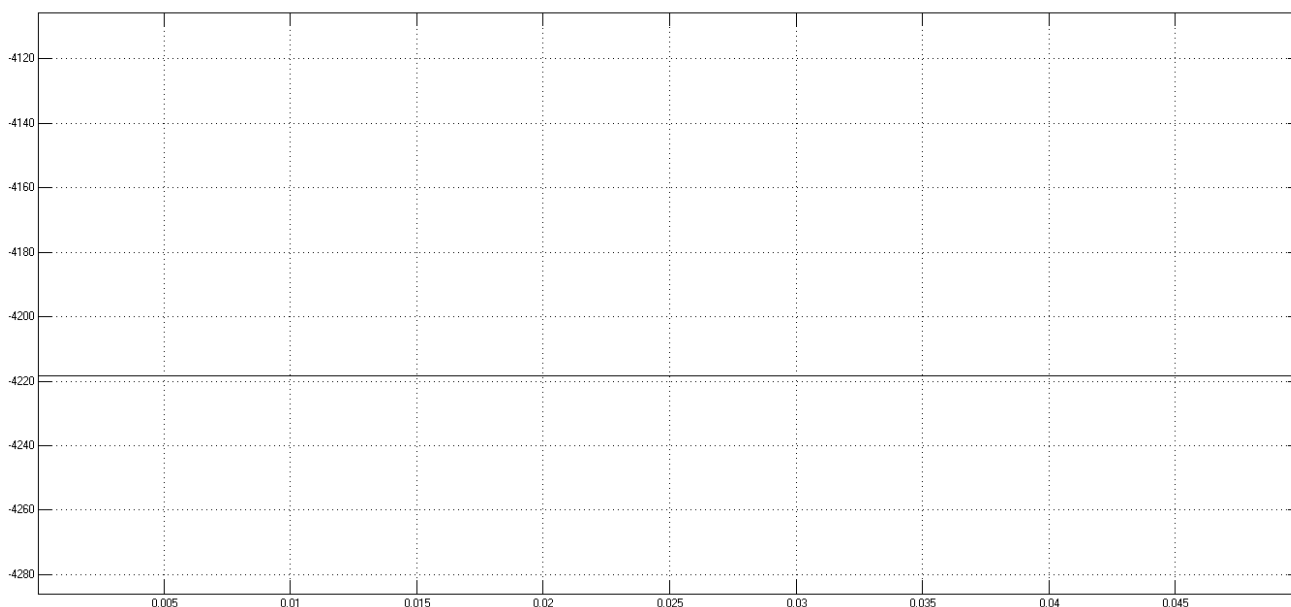


Рис. 4. Графік траєкторії руху системи водопостачання

Рис. 5. Графік поведінки функції Гамільтона H

Отже моделювання та дослідження регуляторів перехідного режиму показує доцільність використання розривних функцій в сигналі керування у системі водопостачання з артезіанських свердловин. При чому такий регулятор забезпечує не тільки оптимальний за швидкодією перехідний процес, а й мінімізує величину пере-регулювання.

6. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Визначено, що для забезпечення мінімального за швидкодією перехідного режиму системи водопостачання з артезіанських свердловин необхід-

но використовувати розривні функції, а сигнал керування повинен задовольняти принципу максимуму.

2. На прикладі розглянуто систему керування у перехідному режимі системи водопостачання з артезіанських свердловин, що забезпечує мінімальний час повернення у режим стабілізації.

Література

1. Сидоренко, В. В. Аналіз причин коливання тиску у системах водопостачання з метою їх мінімізації [Текст]: зб. наук. пр. / В. В. Сидоренко, К. О. Буравченко // Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – 2015. – № 28 (460). – С. 113–117.

2. Буравченко, К. О. Дослідження та аналіз динаміки процесу регулювання насосним агрегатом [Текст] / К. О. Буравченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – Т. 3, № 2 (29). – С. 15–19. doi: 10.15587/2312-8372.2016.71878

3. Reza, J. Application of Several Meta-Heuristic Techniques to the Optimization of Real Looped Water Distribution Networks [Text] / J. Reza, J. Martínez, C. Gil, R. Baños // Water Resources Management. – 2007. – Vol. 22, Issue 10. – P. 1367–1379. doi: 10.1007/s11269-007-9230-8

4. Jung, D. Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study [Text] / D. Jung, D. Kang, M. Kang, B. Kim // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2014. – Vol. 19, Issue 7. – P. 1987–1993. doi: 10.1007/s12205-014-0195-x

5. Araujo, L. S. Pressure Control for Leakage Minimization in Water Distribution Systems Management [Text] / S. Araujo, H. Ramos, S. T. Coelho // Water Resources Management. – 2006. – Vol. 20, Issue 1. – P. 133–149. doi: 10.1007/s11269-006-4635-3

6. Piratla, K. Criticality Analysis of Water Distribution Pipelines [Text] / K. Piratla, S. Ariaratnam // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. – 2011. – Vol. 2, Issue 3. – P. 91–101. doi: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000077

7. Черемісін, М. М. Комплексна автоматизація енергооб'єктів на базі сучасних SCADA систем [Текст] / М. М. Черемісін, А. В. Холод // Енергетика та електротехніка. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3. – С. 128–131.

8. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках [Текст] / Б. С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

9. Петросов, В. А. Стійкість водопостачання [Текст] / В. А. Петросов. – Х.: Фактор, 2007. – 360 с.

10. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления [Текст] / В. Г. Болтянский. – М.: Наука, 1968. – 408 с.

References

1. Sidorenko, V., Buravchenko, K. O. (2015). Analysis of the causes pressure fluctuations in supply systems with a view to minimizing. Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 28 (460), 113–117.

2. Buravchenko, K. (2016). Research and analysis of dynamics of pump unit control process. Technology audit and production reserves, 3/2 (29), 15–19. doi: 10.15587/2312-8372.2016.71878

3. Reza, J., Martínez, J., Gil, C., Baños, R. (2007). Application of Several Meta-Heuristic Techniques to the Optimization of Real Looped Water Distribution Networks. Water Resources Management, 22 (10), 1367–1379. doi: 10.1007/s11269-007-9230-8

4. Jung, D., Kang, D., Kang, M., Kim, B. (2014). Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study. KSCE Journal of Civil Engineering, 19 (7), 1987–1993. doi: 10.1007/s12205-014-0195-x

5. Araujo, L. S., Ramos, H., Coelho, S. T. (2006). Pressure Control for Leakage Minimization in Water Distribution Systems Management. Water Resources Management, 20 (1), 133–149. doi: 10.1007/s11269-006-4635-3

6. Piratla, K. R., Ariaratnam, S. T. (2011). Criticality Analysis of Water Distribution Pipelines. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2(3), 91–101. doi: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000077

7. Cheremisin, M. M., Holod, A. V. (2012). Integrated automation of power based on modern SCADA systems. Cold Power and Electrical Complex automation of power based on modern SCADA Engineering. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute, 3, 128–131.

8. Leznov, B. S. (2006). Energy saving and regulated drive in pump and blower units. Moscow: Energoatomizdat, 360.

9. Petrosov, V. (2007). Water Resistance. Kharkiv: Factor, 360.

10. Boltyanskii, V. G. (1968). Mathematical methods of optimal control. Moscow: Nauka, 408.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Сидоренко В. В.

Дата надходження рукопису 16.05.2016

Буравченко Костянтин Олегович, асистент, кафедра програмування та захисту інформації, Кіровоградський національний технічний університет, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, Україна, 25006
E-mail: buravchenkok@gmail.com