DOI 10.15589/jnn20150416
УДК 681.5.015
С34

ANALYSIS OF THE CAUSES OF PRESSURE FLUCTUATIONS IN WATER SUPPLY SYSTEMS FOR THE PURPOSE OF THEIR MINIMIZATION

АНАЛІЗ ПРИЧИН КОЛИВАННЯ ТИСКУ У СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ З МЕТОЮ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Volodymyr V. Sydorenko
sidrenkvla@rambler.ru
ORCID: 0000-0002-3877-5501

Kostiantyn O. Buravchenko
buravchenkok@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6195-7533

В. В. Сидоренко
д-р техн. наук, проф.

К. О. Буравченко
асп.

Kirovohrad National Technical University, Kirovohrad
Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград

Abstract. Water supply system is a distributed system which requires complex control algorithms. Modern regulators do not consider that there are two modes of water supply: transition and stabilization mode. Transient conditions result from uneven water consumption and impact on sustainability parameters of water supply pipelines. It has been determined that two regulators should be used for effective management in these modes, so the use of a regulator with variable structure is suggested. A proportional regulator provides a minimum time of transition and a proportional-integral regulator ensures the stabilization of pressure in the pipeline. It is also stated that the regulator with variable structure allows reaching the preset parameters of the system operation quality, but not the functional extreme point because it does not use discontinuous functions in control.

Keywords: water supply control system; functional of control system efficiency; regulator with variable structure.

Анотація. Розглянута система керування водопостачанням. Для вирішення питання побудови системи керування запропоновано використати регулятор зі змінними параметрами та структурою. Крім того зауважено, що регулятор зі змінною структурою та параметрами дозволить досягти заданих показників якості роботи системи, але не досягти екстремуму функціоналу, тому що при керуванні не використовує розривних функцій.

Ключові слова: система керування водопостачанням; функціонал ефективності системи керування; регулятор зі змінною структурою.

Аннотация. Рассмотрена система управления водоснабжением. Для решения вопроса построения системы управления предложено использовать регулятор с переменными параметрами и структурой. Кроме того отмечено, что регулятор с переменной структурой и параметрами позволит достичь заданных показателей качества работы системы, но не достичь экстремума функционала, так как при управлении не использует разрывных функций.

Ключевые слова: система управления водоснабжением; функционал эффективности системы управления; регулятор с переменной структурой.

REFERENCES

[1] Aleksandrov V. V., Boltyanskiy V. G., Lemak V. V., Parusnikov N. A., Tikhomirov V. M. *Optimalnoe upravlenie dvizheniem* [Optimal motion control]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2005. 376 p.

[2] Leznov B. S. *Energosberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy saving and regulated drive in pump and blower units]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2006. 360 p.

[3] Petrosov V. A. *Stiikist vodopostachannia* [Water supply stability]. Kharkiv, Faktor Publ., 2007. 360 p.

[4] *Resheniya Schneider Electric v oblasti elektrosnabzheniya i avtomatizatsii sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniy* [Schneider Electric solutions in power supply and automation of water supply and disposal systems]. Mode of access: http://www.schneider-electric.ua/documents/solutions/Water_2007.pdf.

[5] Serdyuk A. A., Korenkova T. V. *Osobennosti modeley vodoprovodnykh nasosnykh kompleksov* [Specific features of models of water pump systems]. *Visnyk KDPU* [Bulletin of Mikhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University]. Vol. 4., 2007, pp. 143–147.

[6] Egilskiy I. S. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami podachi i raspredeleniya vody* [Automated control systems of water supply and distribution processes]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988. 216 p.

[7] Izquierdo J., Perez R., Iglesias L. P. Mathematical Models and Methods in the Water Industry, Mathematical and Computer Modelling, 2004, pp. 1353–1374.

[8] Demand Driven Distribution — great for more than leaks. Mode of access: http://www.grundfos.com/cases/find-case/ddd-dunea.html.

[9] Mathematical Model for Efficient Water Flow Management. Mode of access: https://www.researchgate.net/profile/Marko_Nedeljkov/publication/242999571_Mathematical_model_for_efficient_water_flow_management/links/54689c320cf2397f782d68af.pdf.

[10] Mays L. W. Water distributional systems handbook. McGraw-Hill, Michigan, 2000.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Система керування водопостачанням виконує функції, направлені на забезпечення водою споживачів та підтримку тиску у контрольних точках з мінімальним відхиленням від заданого значення. Регулятори, які використовуються у системах керування водопостачанням, мають постійну структуру і побудовані на основі теорії автоматичного регулювання. Так як водопостачання є енергоємною галуззю промисловості, то на мінімізацію споживання енергії при управлінні направлено багато досліджень. Крім того, враховуючи те, що у системі водопостачання спостерігаються коливальні процеси, одним із важливих завдань є дослідження причин цих коливань та методів їх усунення. Задача стабілізація тиску у трубопроводі та забезпечення стійкості системи водопостачання ускладнюють структуру системи керування та вимагають додаткових економічних витрат.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Задача системи водопостачання полягає у забезпеченні споживачів водою із заданим тиском [1]. У роботах [2 – 3] наведено типові структури системи керування водопостачанням. Розглянуто, що системи керування будуються на основі теорії регулювання. Одним із важливих критеріїв якості роботи є стабілізація тиску у контрольних точках. Аналіз даних робіт показав, що регулятори, які використовуються в даних системах, мають постійну структуру. Значний вплив на стійкість системи водопостачання вносять параметри трубопроводів [4]. Для підтвердження проведено моделювання динаміки процесів, які проходять у системі водопостачання [6 – 8]. Фактори, які впливають на стійкість системи водопостачання, розглянуті у [9], показують необхідність проведення дослідження по даному питанню. Із динаміки роботи системи водопостачання випливає те, що за допомогою регуляторів з постійною структурою неможливо досягти оптимальної траєкторії руху з мінімальною витратою енергії [10].

МЕТА СТАТТІ — визначення причини коливання тиску у трубопроводі у системах водопостачання та пошук методики мінімізації даних коливань.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Системи керування водопостачанням будуються на основі теорії автоматичного регулювання [1 – 3]. У якості об'єкту регулювання виступає система водопостачання. Регулятор на основі стану системи водопостачання $x(t)$ генерує сигнал керування $u(t)$, який мінімізує відхилення виміряного значення від заданого.

Об'єкт, тип регулятора, сигнал $x(t)$ та $u(t)$ визначають ефективність системи водопостачання. Система водопостачання як об'єкт у загальному випадку описується векторним диференціальним рівнянням:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)\,; \qquad (1)$$
$$y(t) = C(t),$$

де $A(t)$ та $B(t)$ — матриці у просторі $(n\times n)$, $(n\times m)$; $x(t)$ — вектор фазового стану розміром $(n\times 1)$; $u(t)$ — вектор керування розміром $(m\times 1)$; $y(t)$ — вектор виходу системи $(m\times 1)$; $C(t)$ — матриця розміром $(m\times n)$.

Регулятор формує сигнал керування на об'єкт за законом, який в загальному випадку виглядає як:

$$f(\Delta y, y', ..., y^{(m)}, \int \Delta y dt).$$

Задаючи матрицю $C(t)$, обирають закони керування: пропорційний, інтегральний або диференціальний. Підбором коефіцієнтів підсилення та зміною структури регулятора досягають заданих характеристик якості перехідного та усталеного процесу.

Задача системи керування полягає в тому, щоб зміною керуючого сигналу $u(t)$ мінімізувати похибку $\varepsilon(t)$, різницю між виміряним $y(t)$ та необхідним сигналом $\hat{y}(t)$:

$$\varepsilon(t) = \hat{y}(t) - y(t) \to \min.$$

Ефективність системи керування водопостачанням проаналізуємо за допомогою функціоналу $J(\varepsilon, u)$, який математично відображає економічні та інженерні вимоги [2].

$$J(\varepsilon,u) = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_k} [\varepsilon^T(t)Q(t)\varepsilon(t) + \qquad (2)$$
$$+ u^T(t)R(t)u(t)]dt + \frac{1}{2}\varepsilon^T(t_k)S\varepsilon(t_k),$$

Q, R, S — симетричні матриці; R — додатньо визначена, $(u^T(t)Ru(t)) > 0$, при $u \neq 0$; Q, S — додатньо напіввизначені, $\varepsilon^T(t)Q(t)\varepsilon(t) \geq 0$, $\varepsilon^T(t_k)S\varepsilon(t_k) \geq 0$, при $\varepsilon \neq 0$.

Розглянемо, як кожен член функціоналу $J(\varepsilon, u)$ відображає інженерні та економічні вимоги до системи водопостачання. Відхилення на протязі всього часу керування описується членом $L_\varepsilon = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_k}[\varepsilon^T(t)Q(t)\varepsilon(t)]dt$. Так як $Q(t)$ — додатньо напіввизначена матриця, то цей член невід'ємний при усіх значеннях $\varepsilon(t)$ та рівний нулю при $\varepsilon(t) = 0$. Вираз для L_ε показує, що система штрафується за великі помилки набагато більше, ніж за малі.

Енергетичні та економічні витрати на керування задаються членом $L_u = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_k}[u^T(t)R(t)u(t)]dt$. Оскільки R — додатньо визначена матриця, то вартість керування додатна при будь-якому значенні $u(t) \neq 0$. Якщо $u(t)$ — скаляр, то величина $u^2(t)$ пропорційна потужності, а $\int_{t_0}^{t_k}[u^2(t)]dt$ пропорційна енергії, яка витрачається на інтервалі $[t_0, t_k]$. Відхилення у кінцевій точці перехідного процесу визначається як $L_s = \frac{1}{2}\varepsilon^T(t_k)S\varepsilon(t_k)$, мета мінімізації даного члену функціоналу — мінімальне відхилення у точці t_k, тобто він розглядається тоді, коли величина $\varepsilon(t)$ в кінцевий момент часу дуже важлива.

Розглянутий математичний апарат побудови функціоналу $J(\varepsilon, u)$ для системи керування справедливий для монотонної траєкторії руху динамічної системи, але у реальних системах водопостачання виникають коливальні процеси. Процес коливання тиску у системі водопостачання відбувається за рахунок нерівномірного споживання води, що суттєво змінює вимоги до системи керування. Для підтвердження зазначеного розглянемо роботу підкачуючої насосної станції міста Мала Виска Кіровоградської області «Мікрорайон», розроблену нами. Коливання тиску у трубопроводі мають стохастичний характер, причому мінімум значення тиску досягається в часи максимального споживання (див. рис. 1).

Значні коливання тиску спостерігаються і у віддалених точках трубопроводу. На рис. 2 зображено коливання тиску у трубопроводі. Вимірювання виконано на вході в житловий будинок.

При коливальному характері тиску $P(t)$ система керування водопостачанням з постійною структурою не може досягти мінімуму функціоналу (2). Для стабілізації коливань в такому випадку в усталеному режимі доцільно використати інтегральний закон, а на ділянках різкої зміни тиску (див. рис. 4) застосувати пропорційно-інтегральний. Таким чином, для досягнення заданих характеристик перехідного та усталеного процессу водопостачання необхідно змінювати не тільки параметри регулятора, а і його структуру. На розробку структури регулятора значно впливають параметри трубопроводу та характер споживання води.

Питанню впливу параметрів трубопроводів на економічні та технічні показники системи керування водопостачанням приділено недостатньо уваги. Гідравлічна мережа характеризується наявністю транспортного запізнення, що показано у [4] та [5]. Запізнення виникає за рахунок немиттєвого розповсюдження тиску у трубопроводі. В залежності від відстані l між точкою подачі води та споживачем води величина запізнення τ змінюється. Час запізнення залежить також від об'єму трубопроводу та матеріалу, з якого він зроблений. Частотний аналіз системи водопостачання показує, що існує критичне значення запізнення, при якому система водопостачання стає нестійкою. Таким чином, вплив трубопроводу ускладнює динаміку системи водопостачання [6].

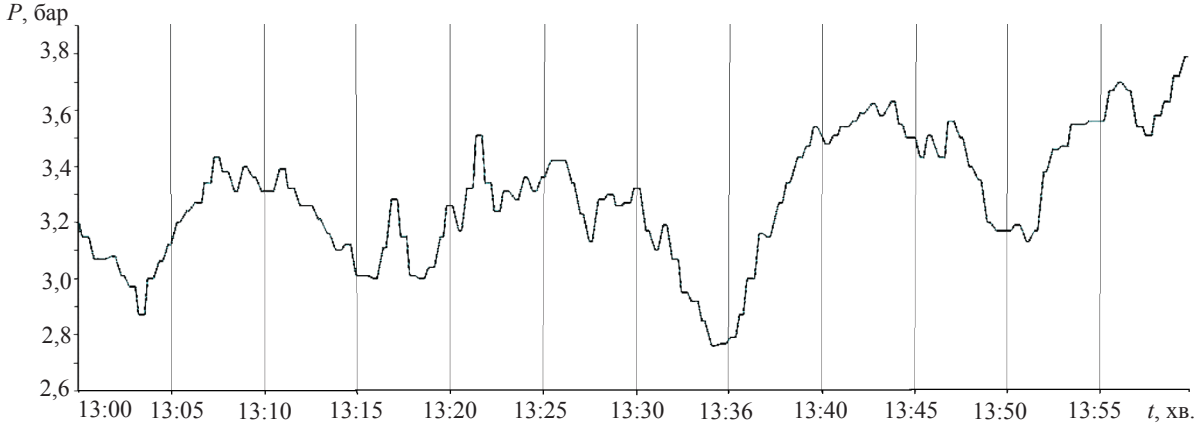

Рис. 1. Графік зміни тиску на підкачуючій насосній станції «Мікрорайон» (м. Мала Виска, Кіровоградська обл.) за одну годину, з 13:00 до 14:00

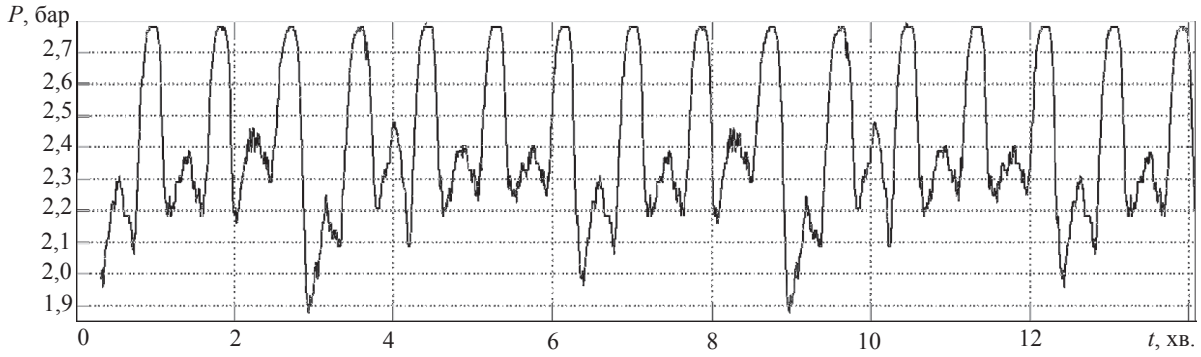

Рис. 2. Графік коливання тиску у заданій точці трубопроводу

Для дослідження динаміки процесу водопостачання розглянемо передаточну функцію системи водопостачання як об'єкта керування. До складу об'єкта входять насосні агрегати та трубопроводи. Насосний агрегат складається з електродвигуна та насосу. Передаточна функція електродвигуна має вигляд [7]:

$$W(p) = \frac{k_{\text{дв}}}{T_{\text{ем}} p + 1}, \qquad (3)$$

$k_{\text{дв}}$ — коефіцієнт підсилення двигуна; $T_{\text{ем}}$ — стала часу двигуна.

В свою чергу $T_{ем}$ визначається як:

$$T_{\text{ем}} = \frac{j\omega_0}{M_n}, \qquad (4)$$

де ω_0 — кутова швидкість ротору при номінальній частоті живлення; M_n — магнітна стала часу.

У статті [7] розглянуто передаточну функцію насосу:

$$W_{N_1}(p) = \frac{Q(p)}{H_N(p) - \Delta H_\Sigma(p)} = \frac{k_N}{T_\Sigma p + 1}, \qquad (5)$$

де $T_\Sigma = T_N + T_u$ — час проходження рідини через насос; $T_N = \dfrac{4(d_2 - d_1)}{\Omega\, z_p \ln\left(\dfrac{d_2}{d_1}\right)}$ — стала часу насосу; d_1 — вхідний діаметр кругової гратки насосу; d_2 — вихідний діаметр кругової гратки насосу; Ω — відносна швидкість руху рідини у між лопатковому просторі; z_p — число лопаток кругової гратки.

Передаточна функція трубопроводу:

$$W(p) = \frac{Q(p)}{P_1(p) - \Delta P(p)} = \frac{k_{mp}}{T_u p + 1}, \qquad (6)$$

де $k_{mp} = \dfrac{vS}{p_2}$ — коефіцієнт підсилення; $T_u = \dfrac{\rho l v}{p_2}$ — інерційна стала часу стовбура рідини; ρ — густина рідини; l — довжина трубопроводу; $v = \dfrac{Q}{S}$ — швидкість руху рідини у трубопроводі; p_2 — тиск на кінці трубопроводу; p_1 — тиск на початку трубопроводу; S — площа поперечного перерізу трубопроводу.

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

$$W(p) = \frac{k_{\text{дв}} k_N k_{mp}}{(T_{\text{ем}} p + 1)(T_\Sigma p + 1)(T_u p + 1)}. \qquad (7)$$

На основі передаточної функції диференціальне рівняння системи водопостачання з урахуванням трубопроводу буде:

$$T_{\text{ем}} T_\Sigma T_u \frac{d^3 y}{dt^3} + (T_{\text{ем}} T_\Sigma + T_{\text{ем}} T_u + T_\Sigma T_u) \times \\ \times \frac{d^2 y}{dt^2} + (T_{\text{ем}} + T_\Sigma + T_u) \frac{dy}{dt} + k_{\text{дв}} k_N k_{mp} y = 0. \qquad (8)$$

На основі запропонованого диференціального рівняння при проектуванні системи керування водопостачанням можливо побудувати динаміку перехідного процесу, перевірити систему на стійкість, наприклад, за допомогою критерія Михайлова, та дослідити показники якості регулятора. Важливо враховувати, що трубопровід — це складна розподілена система, яка вносить запізнення у систему керування водопостачанням. Кожен споживач, підключений до системи трубопроводів, додає запізнення, тому при проектуванні системи керування водопостачанням важливо будувати систему таким чином, щоб величини запізнення не перевищували критичних значень, при яких система стає нестійкою. Фактори, які впливають на стійкість системи водопостачання, розглянуто у роботі [9]. Крім того зауважимо, що хоча регулятори зі змінною структурою дозволять досягти заданих показників якості перехідного та усталеного процесу, але, враховуючи [10], вони не можуть бути оптимальними, тому що для досягнення оптимальної траєкторії динамічної системи при керуванні необхідно застосовувати крім неперервних також і розривні функції.

ВИСНОВКИ. У зв'язку з тим, що характер споживання води та параметри трубопроводів значною мірою впливають на динаміку перехідного процесу,

у системі водопостачання виникають значні перепади тиску. Для стабілізації тиску в такому випадку необхідно застосувати регулятор зі змінною структурою, який включає в себе пропорційно-інтегральний закон в усталеному режимі та пропорційний у перехідному. У формулі (8) доведено, що систему треба будувати таким чином, щоб величини запізнення не перевищували критичних.

Тому у склад системи керування важливо ввести регулятор не тільки зі змінною архітектурою, але і такий, який міг би використовувати при керуванні розривні функції, що дозволить вчасно і швидко реагувати на стрибки тиску у системі. Теорія, що дає змогу розробити таку систему керування, розроблена Л. С. Понтрягіним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] **Александров, В. В.** Оптимальное управление движением [Текст] / В. В. Александров, В. Г. Болтянский, С. С. Лемак, Н. А. Парусников, В. М. Тихомиров. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 376 с.

[2] **Лезнов, Б. С.** Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках [Текст]/Б. С. Лезнов. — М. : Энергоатомиздат, 2006. — 360 с.

[3] **Петросов, В. А.** Стійкість водопостачання [Текст]/В. А. Петросов. — Х. : Фактор, 2007. — 360 с.

[4] Решения Schneider Electric в области электроснабжения и автоматизации систем водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс]. Режим доступа : http://www.schneider-electric.ua/documents/solutions/Water_2007.pdf.

[5] **Сердюк, А. А.** Особенности моделей водопроводных насосных комплексов [Текст]/А. А. Сердюк, Т. В. Коренькова // Вісник КДПУ. — Вип. 4. — 2007. — С. 143 – 147.

[6] **Эгильский, И. С.** Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды [Текст]/И. С. Эгильский. — Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. — 216 с.

[7] **Izquierdo, J.** Mathematical Models and Methods in the Water Industry, Mathematical and Computer Modelling [Text]/J. Izquierdo, R. Perez, L. P. Iglesias, 2004. — Pp. 1353 – 1374.

[8] Demand Driven Distribution — great for more than leaks [Electronic resource]. Mode of access : http://www.grundfos.com/cases/find-case/ddd-dunea.html.

[9] Mathematical Model for Efficient Water Flow Management [Electronic resource]. Mode of access : https://www.researchgate.net/profile/Marko_Nedeljkov/publication/242999571_Mathematical_model_for_efficient_water_flow_management/links/54689c320cf2397f782d68af.pdf.

[10] **Mays, L. W.** Water distributional systems handbook [Text]/L. W. Mays. — McGraw-Hill, Michigan, 2000.

© В. В. Сидоренко, К. О. Буравченко

Надійшла до редколегії 28.08.2015
Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. *М. Я. Хлопенко*