

УДК 681.5.015:621.6.053

Гудь В. М., к.ф.-м.н., доцент, Сидорчук Б. П., к.т.н., доцент
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВІДНОГО ТРАНСПОРТУ

Побудовано математичну модель автоматизованої ділянки трубопроводного транспорту з врахуванням швидкості відкривання заслінки та її гідравлічної характеристики, а також матеріалу трубопроводу, фізико-механічних властивостей продукту та режиму течії.

Ключові слова: автоматизована заслінка, математична модель, трубопровідний транспорт.

Трубопровідний транспорт використовуються в системах перекачування нафти, газу, води, суспензій та сипучих продуктів. При цьому, як правило, виникає необхідність в зміні витрати продукту, що транспортується.

Регулювання потоку, як відомо, можна здійснювати шляхом зміни частоти обертання приводу помпи, дроселюванням потоку на лінії нагнітання або байпасування [1]. Доведено, що найбільш енергоєфективним методом керування витратою речовини є зміна частоти обертання робочого колеса помпи [2]. Проте, незважаючи на більш низький ККД у розподільчих трубопровідних мережах, одним із способів регулювання витрати й надалі залишається дроселювання потоку із використанням регулюючих заслінок або клапанів.

Сучасні системи трубопроводного транспорту неможливо уявити без автоматизованих заслінок. Невпинне розширення спектру автоматизованих заслінок, потребує з'ясування їх впливу на гідравлічні характеристики системи у перехідному режимі роботи. Єдиним способом, який дозволяє передбачити наявність гідравлічних ударів, що можуть виникнути у мережі та дослідити властивості системи залишається математичне моделювання. Проте незважаючи на спроби вирішити дане питання, воно й надалі залишається відкритим.

Задачею даного дослідження є побудова математичної моделі автоматизованої ділянки трубопровідної системи з врахуванням динаміки відкривання заслінки та її пропускної здатності.

Функціональна схема автоматизованої ділянки трубопроводного

транспорту, що досліджувалася, включає трубопровід, поворотну заслінку та електропривод, представлена на рис. 1.

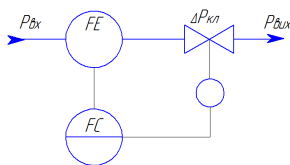


Рис. 1. Функціональна схема автоматизованої ділянки трубопровідного транспорту

Механізм функціонування даної системи можна представити у виді структурної схеми контуру керування приведеної на рис. 2. Вона включає об'єкт керування – трубопровід, регулюючий орган – клапан, виконавчий механізм – привод клапана, регулятор, давач витрати та пристрій, що формуватиме завдання.

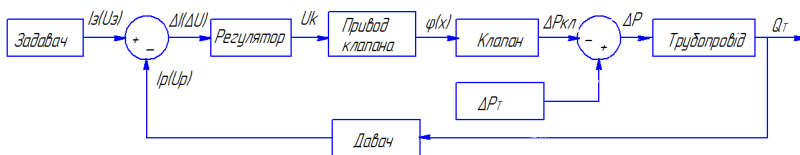


Рис. 2. Структурна схема автоматизованої ділянки трубопровідного транспорту

Для побудови математичної моделі системи визначимо математичні моделі окремих елементів системи: трубопроводу, поворотної заслінки, електроприводу.

Розглянемо трубопровід площею поперечного перерізу S та довжиною L , до кінців якого прикладемо тиск P_{in} та P_{out} . Вважатимемо, що через нього протікає абсолютно нестислива речовина густиною ρ_p та динамічною в'язкістю μ_p . На об'єм рідини, що знаходиться у трубопроводі будуть діяти сили: тиску на вході трубопроводу F_{in} ; тиску на виході з трубопроводу F_{out} ; опору трубопроводу F_T . Відповідно до II закону Ньютона можна записати:

$$ma = F_{in} - F_{out} - F_T, \quad (1)$$

де m – маса продукту в трубопроводі, a – прискорення продукту в трубопроводі.

Враховуючи, що $m = \rho_p L S$ та $a = \frac{dv}{dt}$, (1) прийме наступний

вид:

$$\rho_p L S \frac{dv}{dt} = F_{in} - F_{out} - F_T, \quad (2)$$

де v – швидкість продукту в трубопроводі.

Розділивши рівняння (2) на площу поперечного перерізу трубопроводу S , матимемо

$$\frac{\rho_p L}{S} \frac{dQ}{dt} = p_{in} - p_{out} - \Delta p_r, \quad (3)$$

де ρ_p – густина продукту в трубопроводі ($\text{кг} / \text{м}^3$); $Q = Sv$ – об'ємна витрата речовини через трубопровід ($\text{м}^3 / \text{с}$); p_{in} і p_{out} тиск на вході та виході з трубопроводу (Па), Δp_r – падіння тиску за рахунок сил опору трубопроводу (Па).

Втрати тиску опору складаються із статичних Δp_s , за рахунок зміни геодезичного рівня між входом і виходом трубопроводу та динамічних Δp_d , зумовлених подоланням сил тертя під час руху:

$$\Delta p_r = \Delta p_s + \Delta p_d. \quad (4)$$

Величина Δp_s визначається за співвідношенням:

$$\Delta p_s = \rho_p \cdot g \cdot \Delta h, \quad (5)$$

де ρ_p – густина продукту ($\text{кг} / \text{м}^3$); $g = 9,81 \text{ м} / \text{с}^2$ – прискорення вільного падіння; Δh – різниця геодезичних рівнів входу та виходу трубопроводу.

Динамічні втрати тиску складаються із розподілених Δp_f , спричинених силами в'язкого тертя при протіканні рідини по трубопроводу та місцевих Δp_l втрат тиску, зумовлених різкими змінами діаметрів трубопроводу:

$$\Delta p_d = \Delta p_f + \Delta p_l. \quad (6)$$

Як відомо [3], розподілені втрати тиску Δp_f визначаються за співвідношенням:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho_p v^2}{2}, \quad (7)$$

де D – діаметр поперечного перерізу (m) трубопроводу; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (безрозмірна величина), що характеризує співвідношення сил тертя і інерції.

Враховуючи, що $v = 4Q/\pi D^2$, (4) можна переписати у виді:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho_p (4Q/\pi D^2)^2}{2} = 8 \cdot \lambda \cdot \frac{L \cdot \rho_p}{\pi^2 D^5} Q^2. \quad (8)$$

Значення коефіцієнта тертя λ залежить від режиму течії, який характеризується критерієм (числом) Рейнольдса [3]:

$$Re = \frac{4Q\rho_p}{\pi D\mu_p}, \quad (9)$$

де μ_p – динамічна в'язкість продукту в трубопроводі.

В ламінарному режимі течії коефіцієнт тертя визначається у відповідності до рівняння Пуазейля, а саме $\lambda = 64/Re$, при $Re < 2320$. При турбулентному режимі течії коефіцієнт тертя визначається за експериментальними співвідношеннями Блязіуса [4]: $\lambda = (0,3164 \cdot Re)^{-0,25}$ для $3000 < Re < 100000$. У випадку коли величина числа Рейнольдса набуває значень $Re > 27(D/\xi)^{1,14}$, значення коефіцієнта тертя λ набуває постійного значення: $\lambda = 0,5 / (\lg(3,7D/\xi))^2$, де ξ – нормативна еквівалентна шорсткість труби.

Місцеві втрати тиску Δp_l визначаються суперпозицією втрат тиску на ділянках звуження трубопроводу Δp_c та заслінках Δp_v :

$$\Delta p_l = \Delta p_c + \Delta p_v. \quad (10)$$

Як відомо [5], місцеві втрати тиску p_c можна визначити за співвідношенням:

$$\Delta p_c = 16 \frac{k \cdot \rho_p}{\pi^2 d^4} Q^2, \quad (11)$$

де $k \approx 1$ – поправочний коефіцієнт, d – еквівалентний діаметр ділянки звуження.

Падіння тиску на поворотній заслінці Δp_v визначається за співвідношенням [3]:

$$\Delta p_v = \delta \left(\frac{Q}{K_{vs}(\varphi)} \right)^2, \quad (12)$$

де $\delta = \rho_p / \rho_w$ – відносна густина продукту, ρ_w – густини води ($\text{кг} / \text{м}^3$), $K_{vs}(\varphi)$ – миттєве значення умовної пропускної здатності заслінки ($\text{м}^3 / \text{год}$).

Як слідує з (12), на величину перепаду тиску на клапані впливає витрата речовини в трубопроводі та пропускна здатність регулюючого органу. Оскільки витрата рідини є параметром, який підлягає регулюванню, єдиною величиною, що дозволяє регулювати падіння тиску на клапані залишається K_{vs} . Значення пропускної здатності заслінки у свою чергу залежить від її кута повороту та визначається експериментально. Для зміни положення регулюючого органу автоматизованої заслінки використовується електропривод.

В залежності від сигналів дійсного та необхідного положення регулюючого органу здійснюється поворот заслінки в одну чи в іншу сторону на заданий кут або відстань.

$$\frac{d\varphi_{out}}{dt} = \text{sign}(\varphi_{in} - \varphi_{out}) \cdot \omega, \quad (13)$$

де sign – знакова функція; φ_{in} та φ_{out} – задане (необхідне) та дійсне значення положення клапана або заслінки; ω – швидкість повороту регулюючого органу (заслінки).

Швидкість повороту ω можна визначити відповідно до:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi_{max}}{\Delta t_{max}}, \quad (14)$$

де $\Delta\varphi_{max}$ – максимальна зміна кута повороту регулюючого органу, Δt_{max} – час повного відкриття заслінки.

Отже, з врахуванням (3-14) математична модель автоматизованої ділянки трубопровідної системи матиме вигляд:

$$\frac{\rho L}{S} \frac{dQ}{dt} = p_{in} - p_{out} - \rho \cdot g \cdot \Delta h - 8 \cdot \lambda \cdot \frac{L \cdot \rho}{\pi^2 D^5} Q^2 - 16 \frac{k \cdot \rho}{\pi^2 d^4} Q^2 - \delta \left(\frac{Q}{K_{vs}(\varphi_{out})} \right)^2, \quad (15)$$

$$\frac{d\varphi_{out}}{dt} = \frac{\Delta\varphi_{max}}{\Delta t_{max}} \cdot \text{sign}(\varphi_{in} - \varphi_{out}), \quad (16)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re}, & \text{npri } Re < 2320, \\ (0,3164 \cdot Re)^{-0,25}, & \text{npri } 3000 < Re < 100000, \\ 0,5 / (\lg(3,7D / \xi))^2, & \text{npri } Re > 27(D / \xi)^{1,14}. \end{cases} \quad (17)$$

Для моделювання роботи системи побудовано імітаційну модель у додатку Simulink середовища Matlab (рис. 3).

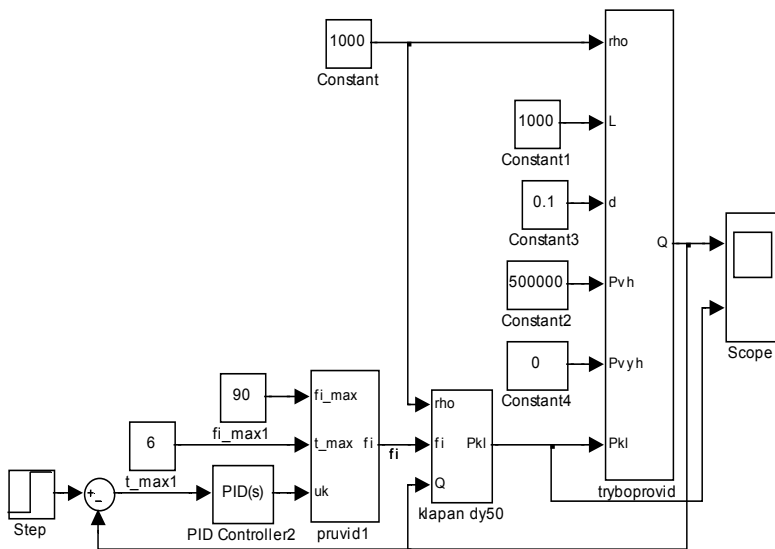


Рис. 3. Імітаційна модель автоматизованої ділянки трубопроводу

Моделювання здійснювалось для ділянки сталюого трубопроводу діаметром 100 мм та довжиною 1 км заповненого водою, втрати тиску якого приймались відповідно до відомих даних [2]. Регулювання витрати здійснювались, використовуючи поворотну заслінку типу SYLAX DN50 виробництва Danfoss. В якості виконавчих механізмів використовувались типові приводи заслінок Bernard OOA3 (час повно-

го відкриття 6 с) та Belimo SM220A (час повного відкриття 150 с).

У результаті проведеного моделювання динаміки зміни витрати та тиску в трубопроводі при використанні приводу Bernard OA3 (рис. 4) виявилось, що зміна положення заслінки в початковий момент часу зумовлює пульсації тиску в гідравлічній системі, які досягають до 20% від рівноважного стану. Однак збільшення часу повного відкриття (рис. 5) до 150 с показало, що амплітуда пульсацій тиску практично повністю нівелюються.

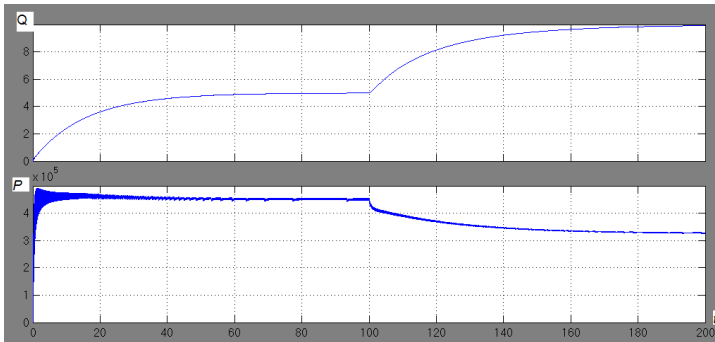


Рис. 4. Динаміка зміни витрати Q (л/с) та падіння тиску P (Па) на заслінці під час регулювання при використанні приводу Bernard OA3 (час повного відкриття 6 с)

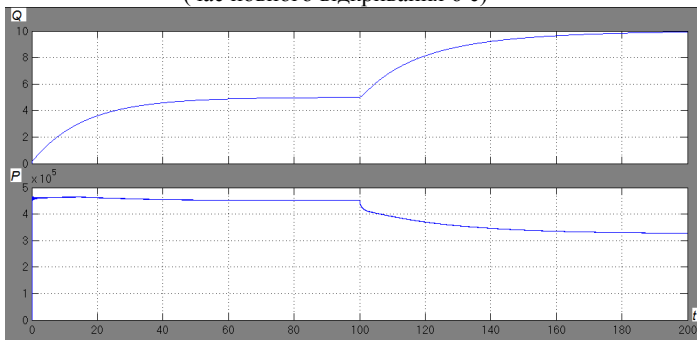


Рис. 5. Динаміка зміни витрати Q (л/с) та падіння тиску P (Па) на заслінці під час регулювання при використанні приводу Belimo SM230A (час повного відкриття 150 с)

Таким чином, в результаті моделювання встановлено, що зміна швидкості відкривання поворотної заслінки зумовлює пульсації тиску системи трубопровідного транспорту. Показано, що усунути пульсації тиску в транспортній системі можна використовуючи приводи з часом повного відкривання більше 150 с. Розроблена модель може бути використана для дослідження гідравлічних характеристик автоматизованих ділянок системи трубопровідного транспорту.

1. Пыркoв В. В. Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование. – К. : П ДП «Такі справи», 2008. – 252 с. 2. Шeвeлeв А. Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб Справочное пособие. – 8-е изд., перераб. и дополн. – М. : Изд-во ООО"Бастет", 2007. – 336 с. 3. Большаков В. А. Гидравлика. Общий курс : учебник для вузов / В. А. Большаков, В. Н. Попов – Киев, 1989. – 215 с. 4. Большаков В. А. Справочник по гидравлике: справочник / В. А. Большаков, Ю. М. Константинов, В. Н. Попов, В. Ю. Даденков. – Киев, 1977. – 279 с. 5. Древецький В. В. Гідродинамічні методи і прилади для вимірювання в'язкості та густини нафтопродуктів: автореф. дис. доктора технічних наук : 05.11.13. – К., 2009. – 36 с.

Рецензент: д.т.н., професор Древецький В. В. (НУВГП)

Gud V. M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Sydorчук B. P., Candidate of Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

MATHEMATICAL MODELING OF AUTOMATED SITE PIPELINE TRANSPORTA

A mathematical model of the automated portion of the pipeline transport with the valve opening speed and hydraulic characteristics , as well as pipe material, physical and mechanical properties of the product and the flow regime.

Keywords: automated valve, mathematical model, pipeline transport.

Гудь В. М., к.ф.-м.н., доцент, Сыдорчук Б. П., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДНОГО
ТРАНСПОРТА**

Построена математическая модель автоматизированного участка трубопроводного транспорта с учетом скорости открывания заслонки и ее гидравлической характеристики, а также материала трубопровода, физико-механических свойств продукта и режима течения.

***Ключевые слова:* автоматизированная заслонка, математическая модель, трубопроводный транспорт.**
