

В. Г. Мусаєв, д. т. н., доц.; Е. Б. Імамалієв, к. т. н., доц.; Н. Е. Гусейнов, к. т. н., доц.

ДИСКРЕТНИЙ МЕТОД ТА СИСТЕМНО-СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ЗАДАЧ У МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ ЗІ ЗМІНОЮ ТИСКУ НА ПОЧАТКУ ТА ВИТРАТИ В КІНЦІ

У статті розглянуто застосування системно-структурного аналізу спільно з дискретним методом під час розробки технологічних основ керування складними магістральними трубопроводними системами. Посднання дискретного та системно-структурного методу дозволяє уніфікувати задачі у складних системах з розподіленими параметрами з метою вироблення єдиних схем аналізу та розрахунку параметрів потоку.

Ключові слова: системно-структурний аналіз, дискретний метод, магістральний трубопровід, розподілений параметр, структурно-архітектурна модель.

Вступ. Магістральні нафтопроводні системи через свої специфічні технологічні особливості є одним з яскравих прикладів систем з розподіленими параметрами, які працюють у динамічних режимах. Динамічні процеси, які відбуваються в цих системах, описуються системами рівнянь у частинних похідних.

Дослідження показали, що магістральні нафтопроводи (МНП) належать до складних систем з розподіленими параметрами. Вони мають достатню довжину з проміжними джерелами збурень, є розгалуженими неоднорідними системами. Оскільки джерела первинної інформації в цих системах розташовані на значних відстанях одне від одного, то вони становлять складну систему з розподіленими параметрами з розподіленими базами даних [3].

Сьогодні методи системно-структурного аналізу успішно використовують для отримання детальної та узагальненої інформації про процеси, які досліджують, розробку шляхів цілеспрямованого синтезу структури складних систем і методів нестационарних вимірювань [4, 5, 6]. Сьогодні під час розв'язку задач для складних систем з розподіленими параметрами широко використовують поєднання дискретного методу [1] та системно-структурного аналізу [2] з метою отримання детальної та узагальненої інформації про стан досліджуваних процесів, визначення шляхів цілеспрямованого синтезу структури системи та розробки методів нестационарних вимірювань. Розв'язок задачі зводиться до адаптації математичних моделей до реальних умов за допомогою ідентифікації параметрів системи з вибору правильних розв'язків.

Схема аналізу та розрахунку для нафтопроводних систем, яку використовують, ґрунтується на розв'язку диференційних рівнянь руху рідини за відповідних крайових умов, які дозволяють розрахувати стаціонарні, нестационарні тиски та витрати нафти. Однак цього недостатньо, оскільки не завжди можна провести детальний аналіз фізичних процесів, що відбуваються. Цей підхід не дозволяє розв'язати такі задачі, як: корекція та синтез систем з наперед заданими процесами формування полів тиску, а також деякі задачі, пов'язані з керуванням процесом, за якого необхідним є визначення постійних коефіцієнтів, які входять у рівняння руху нафти [4].

Виходячи з вищевикладеного, розробка узагальненої ідеології розрахунку й аналізу поведінки систем з розподіленими параметрами, із застосуванням дискретного й системно-структурного методів, вироблення технології адаптації розрахункових моделей до реальних умов експлуатації цих систем безвідносно до геометричної й динамічної топології є актуальною проблемою для дослідження й аналізу динамічних процесів у магістральних

трубопроводних системах.

Постановка задачі. У цій статті розглянуто вживання системно-структурного аналізу [3] спільно з дискретним методом під час розробки технологічних основ управління складними магістральними трубопроводними системами. Поєднання дискретного й системно-структурного методів дозволяє уніфікувати завдання у складних системах з розподіленими параметрами з метою вироблення єдиних схем аналізу й розрахунку параметрів потоку. При цьому розв'язок задачі динаміки розглядають як деяку систему, представлену структурною схемою. Елементами структурної схеми є математичні оператори, що встановлюють правила перетворення деяких дій на об'єкт у породжувану ними реакцію.

Ця проблема зводиться до адаптації математичних моделей до реальних умов за допомогою ідентифікації параметрів системи з метою вибору правильних розв'язків, а також до розв'язання низки зворотних і псевдозворотних задач на основі розроблених нами розрахункових архітектурних моделей управління.

Методи розв'язання. У цій праці в якості математичного апарату використовують двократне і дискретне перетворення Лапласа. Під час переходу від зображення до оригіналу функцій застосовують рекурентні співвідношення [1].

Відомо, що дослідження динамічних процесів у магістральному нафтопроводі зводиться до розв'язання рівняння руху й нерозривності за відповідних початкових і краєвих умов [3].

Робочий процес у магістральному нафтопроводі із зміною тиску на початку і витратами в кінці труби завдовжки ℓ , розташованої в декартовій системі координат уздовж осі абсцис, описують рівняннями руху й нерозривності [3] у вигляді:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = \kappa_1 \frac{\partial G(x,t)}{\partial t} + \kappa_3 G(x,t), \\ -\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \kappa_2 \frac{\partial G(x,t)}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

За початкових і граничних умов:

$$\begin{aligned} P(x,t)|_{x=0} &= P(0,t) = \varphi_1(t), \\ \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=\ell} &= \omega(x,t)_{x=0} = \varphi_2(t), \end{aligned}$$

де $P(x,t)$ – тиск; $G(x,t)$ – витрата; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – постійні коефіцієнти; $\varphi_1(t)$ та $\varphi_2(t)$ – функції часу.

Розв'язуючи системи рівнянь (1) операторним методом, використовуючи двократне перетворення Лапласа, на першому етапі отримуємо зображення для шуканих функцій і $P(x,t)$ та $G(x,t)$. Потім за допомогою зворотного перетворення і застосування дискретного перетворення Лапласа відновимо однократне зображення функцій $P(x,t)$, $G(x,t)$.

Розв'язання рівнянь у приватних похідних, знайдених за допомогою двократного перетворення Лапласа, не залежить від послідовності вживання прямого і зворотного перетворень. Очевидно, що вдало вибраний порядок у двократному перетворенні може значно полегшити розв'язання задачі [1].

Розв'язуючи задачу відносно $P(x,t)$ в області зображень, отримаємо:

$$\bar{P}(x,s) = \frac{ch\gamma(l-x)}{ch\gamma l} \cdot \bar{\varphi}_1(s) + \frac{sh\gamma x}{\gamma ch\gamma l} \cdot \bar{\varphi}_2(s).$$

Представимо отриманий вираз у вигляді суми двох тисків:

$$\bar{P}(x,s) = \bar{P}_1(x,s) + \bar{P}_2(x,s), \quad (2)$$

$$\text{де } \bar{P}_1(x, s) = \frac{ch \gamma (l-x)}{ch \gamma l} \cdot \bar{\varphi}_1(s), \quad \bar{P}_2(x, s) = \frac{sh \gamma x}{\gamma ch \gamma} \cdot \bar{\varphi}_2(s),$$

Тут $\bar{\gamma}(s) = \sqrt{sk_2(k_3 + sk_1)}$ – коефіцієнт поширення хвилі.

Тоді з виразу (2) для $\bar{P}_1(x, s)$ у різних перерізах трубопроводу отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{p}_1(0, s) &= \bar{\varphi}_1(s), \\ \bar{p}_1(l, s) &= \bar{p}_1(0, s) \cdot \frac{1}{ch \gamma l}, \\ \bar{p}_1(x, s) &= \bar{p}_1(l, s) \cdot ch \gamma (l-x), \end{aligned} \quad (3)$$

градієнт тиску

$$\frac{\partial \bar{p}_1(x, s)}{\partial x} = -\gamma \cdot \bar{p}_1(x, s) \cdot th \gamma (l-x), \quad (4)$$

масову швидкість

$$\bar{G}_1(x, s) = -\frac{1}{\bar{b}_1(s)} \cdot \frac{\partial \bar{p}_1(x, s)}{\partial x}, \quad (5)$$

де $\bar{b}_1(s) = \sqrt{(sk_1 + k_3)/k_2}$ – хвилевий опір трубопроводу.

Аналогічно для $\bar{P}_2(x, t)$ та $\bar{G}_2(x, t)$ отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{p}_2(0, s) &= 0, \\ \bar{p}_2(x, s) &= \bar{p}_2(l, s) \frac{sh \gamma x}{sh \gamma l}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\bar{p}_2(l, s) = \frac{1}{\gamma} \cdot \bar{\varphi}_2(s) \cdot th \gamma l,$$

$$\frac{\partial \bar{p}_2(x, s)}{\partial x} = \gamma \cdot \bar{p}_2(x, s) \cdot th \gamma x, \quad (7)$$

$$\bar{G}_2(x, s) = \frac{1}{\bar{b}_1(s)} \cdot \frac{\partial \bar{p}_2(x, s)}{\partial x}. \quad (8)$$

Вирази (2) – (8) дозволяють скласти структурну модель, яка характеризує динамічні процеси в досліджуваній системі, у вигляді суми двох тисків $\bar{P}_1(x, s)$ та $\bar{P}_2(x, s)$ (рис. 1).

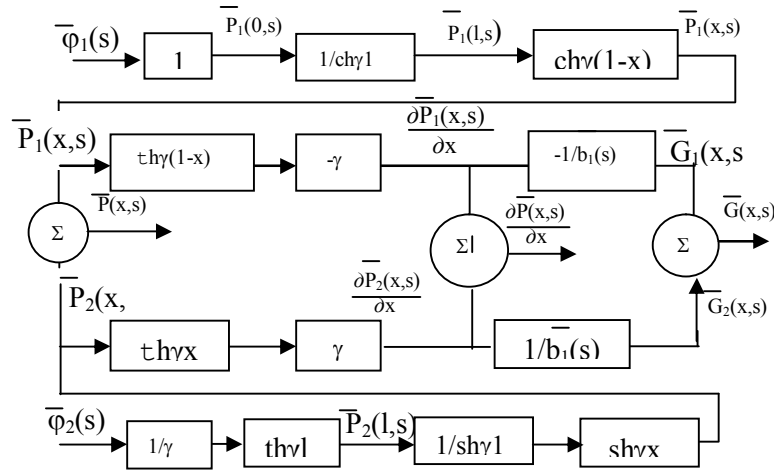


Рис. 1. Структурна модель руху рідини в трубопроводі

Як видно з рис. 1, динамічні процеси, що відбуваються в магістральних трубопроводах є досить складними завданнями у складних системах із розподіленими параметрами.

Розглянемо розв’язок задачі структурного аналізу динамічних процесів у МНП з відомою зміною тиску на початку і витрати в кінці згідно зі структурною архітектурною моделлю (рис. 1) і на основі дискретного методу [1].

Згідно рис. 1 інформативну ланку структурної схеми, що встановлює зв’язок між $\bar{P}_1(0,s)$ і $\bar{\varphi}_1(s)$, можна представити як на рис. 2.

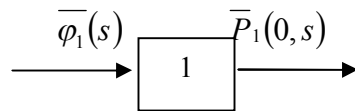


Рис. 2. Ланка структурної схеми, що встановлює зв’язок між $\bar{P}_1(0,s)$ і $\varphi_1(s)$

Відповідно рис. 2 можна записати:

$$\bar{P}_1(0,s) = 1 \cdot \varphi_1(s) . \tag{9}$$

Застосовуючи дискретне перетворення та теорему звертання, рівняння (9) в області оригіналів можна представити як:

$$P_1[0,n] = \sum_{m=0}^n \varphi_1[m] \cdot 1[n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P_1[0,m] \cdot 1[n-m]. \tag{10}$$

Зв’язок між $\bar{P}_1(1,s)$ та $\bar{P}_1(0,s)$ визначають операторною функцією ланки, показаної на рис. 3.

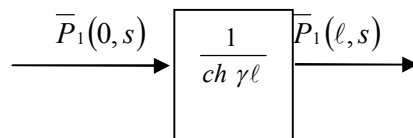


Рис. 3. Ланка структурної схеми, яка встановлює зв’язок між тисками в точках $x=0$ та $x=\ell$

Відповідно до рис. 3 можна записати:

$$\bar{P}_1(1,s) = \frac{1}{ch \gamma \ell} \bar{P}_1(0,s) \tag{11}$$

або з урахуванням $ch \gamma \ell = \frac{1}{2}(\ell^{\gamma \ell} + \ell^{-\gamma \ell})$ рівняння (11) можна представити як:

$$\bar{P}(\ell, s) = \frac{2e^{-\gamma\ell}}{1 + e^{-2\gamma\ell}} \bar{P}_1(0, s). \quad (12)$$

Звідки згідно з дискретним методом і теоремою зворотання, рівняння (12) в області оригіналів можна представити як:

$$P_1[\ell, n] = \frac{1}{1 + K_4[0]} \left(2 \sum_{m=0,5\lambda}^n K'_5[m] P_1[0, n-m] - \sum_{m=\lambda}^n K'_4[n-m] P_1[\ell, m] - \sum_{m=0}^{n-1} P_1[\ell, m] \cdot 1[n-m] \right). \quad (13)$$

Зв'язок між $\bar{P}_1(x, s)$ та $\bar{P}_2(\ell, s)$ визначають операторною функцією ланки, яка показана на рис. 4.

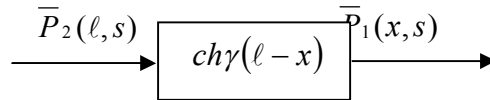


Рис. 4. Ланка структурної схеми, яка встановлює зв'язок між тисками $\bar{P}_1(x, s)$ та $\bar{P}_2(\ell, s)$
Звідки відповідно до рис. 4 в операторній формі отримаємо:

$$2 \bar{P}_1(x, s) \frac{1}{s} e^{-2\gamma\ell(0,5-\delta)} = \frac{1}{s} (1 + e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}) \bar{P}_2(\ell, s). \quad (14)$$

Застосовуючи дискретний метод та теорему зворотання, отримаємо:

$$P_2[\delta, n] = \frac{1}{2K_{11}[0]} \left(\sum_{m=0}^{n1} P_2[\ell, m] \cdot 1[n-m] + \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^m K'_{11}[m] P_1[\ell, n-m] - 2 \sum_{m=\lambda(0,5-\delta)}^n K_{11}[n-m] P_1[\delta, m] \right), \quad (15)$$

де $K_{11}[n]$ та $K'_{11}[n]$ – оригінали функцій $\bar{K}_{11}(s)$ та $\bar{K}'_{11}(s)$, які визначають за таблицею зображень [7].

$$K_{11}[n] = \begin{cases} 0, & \text{за } m < (0,5 - \delta)\lambda \\ e^{-\alpha T} + \alpha T \sum_{m=(0,5-\delta)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha m T}{\lambda}} \frac{I_0\left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(0,5 - \delta)\lambda]^2}\right)}{\sqrt{m^2 - [(0,5 - \delta)\lambda]^2}} & \text{за } m > (0,5 - \delta)\lambda, \end{cases}$$

$$K'_{11}[n] = \begin{cases} 0, & \text{за } n < (1 - \delta)\lambda \\ e^{-\alpha T} + \alpha T \sum_{m=(1-\delta)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha T m}{\lambda}} \frac{I_1\left(\frac{\alpha_2 T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(1 - \delta)\lambda]^2}\right)}{\sqrt{m^2 - [(1 - \delta)\lambda]^2}} & \text{за } m > (1 - \delta)\lambda. \end{cases}$$

Зв'язок між градієнтом $\text{grad} \bar{P}_1(x, s)$ та $P_1(x, s)$ відповідно до рис. 1 визначають операторною функцією ланки, яка показана на рис. 5.

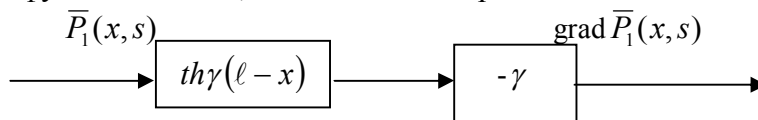


Рис. 5. Ланка структурної схеми, яка встановлює зв'язок між тисками $\text{grad} \bar{P}_1(x, s)$ та $\bar{P}_1(x, s)$

Відповідно до рис. 5 $\text{grad} \bar{P}_1(x, s)$ в операторній формі визначають:

$$\text{grad} \bar{P}_1(x, s) = -\gamma \text{th}\gamma(\ell - x) \bar{P}_1(x, s), \quad (16)$$

звідки відповідно до теорії дискретних систем та теоремі зворотання

$$\begin{aligned} gradP_1[\delta, n] = & \frac{1}{1 - K'_{11}[0]} \sum_{m=0}^n K_{14}[m] P_1[\delta, n] - \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^n K'_{11}[n-m] gradP_1[\delta, m] - \\ & - \sum_{m=0}^{n-1} gradP_1[\delta, m] \cdot 1[n-m], \end{aligned} \quad (17)$$

де $K_{14}[n]$, $K_{15}[n]$ – відповідно оригінали функцій

$$\begin{aligned} \bar{K}_{14}(s) = & \frac{1}{s} \sqrt{\frac{s + \alpha_2}{s}} \gamma, \quad \bar{K}_{15}(s) = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{s + \alpha_2}{s}} e^{-2\gamma(1-\delta)}, \quad \alpha_2 = \frac{\bar{K}_2}{\bar{K}_1}, \\ K_{14}[n] = & e^{-\frac{\alpha_{22}nT}{2\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha_2 nT}{2\lambda}\right) + \alpha_2 \sum_{m=0}^n e^{-\frac{\alpha_{12}mT}{2\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha_2 mT}{2\lambda}\right) \text{ за } m > 0. \end{aligned}$$

Зв'язок між $\bar{G}_1(x, s)$, $grad\bar{P}_1(x, s)$ визначають операторною функцією ланки, яка показана на рис. 6.

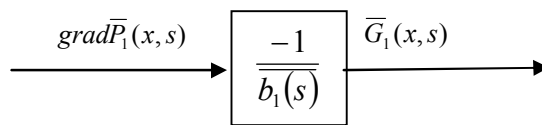


Рис. 6. Ланка структурної схеми, яка встановлює зв'язок між $grad \bar{P}_1(x, s)$ та $\bar{G}_1(x, s)$

Звідки з рис. 6 отримуємо:

$$\bar{G}_1(x, s) = -\frac{1}{\bar{b}_1(s)} grad\bar{P}_1(x, s). \quad (18)$$

Рівняння (18) в області оригіналів можна представити таким рекурентним співвідношенням

$$G_1[\delta, n] = -\alpha_3 \sum_{m=0}^n K_3[m] \cdot gradP_1[\delta, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} G_1[\delta, m] \cdot 1[n-m], \quad (19)$$

де $K_3[n] = e^{-\alpha_2 \frac{nT}{\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha_2 nT}{\lambda}\right)$ – оригінал функції $\bar{K}_3(s) = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{s}{s + \alpha_2}}$, яку визначають за таблицею зображень [7].

Аналогічним чином для другої вітки структурної схеми (рис. 1) можна отримати рекурентні співвідношення, які визначають зв'язок між $\bar{P}_2(1, s)$ та $\bar{\varphi}_2(s)$:

$$\begin{aligned} \varphi_2[n] = & \frac{1}{\alpha_1(K_{14}[0] + K_{26}[0])} \left\{ \sum_{m=0}^n \varphi_2[m] 1[n-m] - \sum_{m=\lambda}^n K'_4[m] \varphi_2[n-m] - \alpha_1 \sum_{m=0}^{n-1} P_2[\ell, m] K_{14}[n-m] - \right. \\ & \left. - \alpha_1 \sum_{m=\lambda}^{n-1} K_{26}[n-m] P_2[\ell, m] \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

де $K_{26}[n]$ оригінал функції $\bar{K}_{26}(s) = \sqrt{\frac{s + \alpha_2}{s}} e^{-2\alpha_1 \sqrt{(s + \alpha_2)s} \ell}$, який визначають за таблицею зображень [7].

$$K_{26}[n] = \begin{cases} 0, & \text{за } 0 \leq m \leq \lambda \\ e^{-\alpha_n \frac{t}{\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{n^2 - \lambda^2}\right) + \alpha \sum_{m=\lambda}^n e^{-\alpha \frac{nT}{\lambda}} \cdot I_0\left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{m^2 + \lambda^2}\right), & \text{за } m > \lambda \end{cases}$$

Між $\bar{P}_2(x, s)$ та $\bar{P}_2(\ell, s)$:

$$P_2[\ell, n] = \sum_{m=\lambda(\delta-0,5)}^n K_{27}[m]P_2[\delta, n-m] + \sum_{m=\lambda(\delta-0,5)} K_{28}[m]P_2[\delta, n-m] + \sum_{m=0,5\lambda\delta}^n K_{16}[m]P_2[\delta, -n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P_2[\ell, m]I[n-m], \quad (21)$$

де $K_{16}[n]$, $K_{27}[n]$, $K_{28}[m]$ – відповідно оригінали функцій

$$\bar{K}_{27}[s] = \frac{1}{s}e^{-\gamma(x-\ell)}, \quad \bar{K}_{28}[s] = \frac{1}{s}e^{-\gamma(\ell+x)},$$

$$K_{16}[n] = \begin{cases} 0, & \text{за } n < \delta\lambda \\ e^{-\frac{\alpha_2 n T}{2\lambda}} + \delta\lambda \sum_{m=\delta\lambda}^n e^{-\frac{\alpha_2 m T}{2\lambda}} \frac{I_1\left(\frac{\alpha_2 T}{2\lambda} \sqrt{m^2 - (\delta\lambda)^2}\right)}{\sqrt{m^2 - (\delta\lambda)^2}} & \text{за } m > \delta\lambda, \end{cases}$$

$$K_{27}[n] = \begin{cases} 0, & \text{за } m < (\delta - 0,5)\lambda \\ e^{-\alpha_2 T} + \alpha_2 T \sum_{m=(\delta-0,5)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha_2 m T}{\lambda}} \frac{I_0\left(\frac{\alpha_2 T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(\delta - 0,5)\lambda]^2}\right)}{\sqrt{m^2 - [(\delta - 0,5)\lambda]^2}} & \text{за } m > (\delta - 0,5)\lambda, \end{cases}$$

$$K_{28}[n] = \begin{cases} 0, & \text{за } m < (0,5 + \delta)\lambda \\ e^{-\alpha_2 T} + \alpha_2 T \sum_{m=(0,5+\delta)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha_2 m T}{\lambda}} \frac{I_0\left(\frac{\alpha_2 T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(0,5 + \delta)\lambda]^2}\right)}{\sqrt{m^2 - [(0,5 + \delta)\lambda]^2}} & \text{за } m > (0,5 + \delta)\lambda. \end{cases}$$

Між $grad\bar{P}_2(x, s)$ і $\bar{P}_2(x, s)$:

$$gradP_2(\delta, n) = \frac{1}{1 + K_{16}[0]} \left\{ -\alpha_1 \left(\sum_{m=0}^n K_5[m]P_2[\delta, n-m] - \sum_{m=\lambda\delta}^n K_{18}[m]P_2[n-m] \right) - \sum_{m=0,5\lambda\delta}^n K_{16}[n-m]gradP_2[\delta, m] - \sum_{m=0}^{n-1} gradP_2[\delta, m] \cdot I[n-m] \right\}, \quad (22)$$

де $K_{16}[n]$, $K_{18}[n]$ – оригінали функцій $\bar{K}_{16}[s]$, $\bar{K}_{18}[s]$.

Зв'язок між $\bar{G}_2(x, s)$ та $grad\bar{P}_2(x, s)$ визначають як:

$$G_2[\delta, n] = -\alpha_3 \sum_{m=0}^n K_3[m]gradP_2[\delta, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} G_2[\delta, m] \cdot I[n-m]. \quad (23)$$

Отримані результати. Для різних завдань динаміки згідно з розробленою структурно-архітектурною моделлю магістрального трубопроводу, показаного на рис. 1, в області оригіналів було знайдено відповідні рекурентні співвідношення, які мають досить простий вигляд і складаються тільки з сум параметрів, які описують процеси, що відбуваються в магістральних трубопроводах.

Аналогічно можуть бути розв'язані й інші технологічні ситуації, які спостерігаємо на практиці.

Отримані рекурентні співвідношення легко можуть бути реалізовані за допомогою сучасних обчислювальних засобів, що є істотним під час дослідження складних динамічних систем з розподіленим параметрами.

Висновки. Побудовані структурні архітектурні моделі, як модель фізичного процесу, є одним із зручних способів опису й аналізу взаємозв'язаних процесів. На підставі структурних архітектурних моделей можна написати рівняння ланки або групи ланок, що дозволяє встановити зв'язок між коефіцієнтами і змінними рівнянь. Складені таким чином структурні архітектурні моделі дозволяють візуалізувати взаємодії й перетворення тиску та витрати, є інформативною математичною моделлю динамічних процесів у магістральних нафтопроводних системах. Загалом структурні архітектурні моделі відображають безперервну інформацію про стан об'єкта. За необхідності, перейшовши в область оригіналів, можна отримати наближену або точну інформацію на певний момент.

Отже, поєднання дискретного і системно-структурного методів дозволяє уніфікувати завдання в складних системах з розподіленими параметрами з метою вироблення єдиних схем аналізу й розрахунку параметрів потоку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кадымов Я. Б. Переходные процессы в системах с распределенными параметрами / Кадымов Я. Б. – М.: Наука, 1968. – 192 с.
2. Шашков А. Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение / Шашков А. Г. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 280 с.
3. Мусаев В. Г. Сложные системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов / Мусаев В. Г. – Баку: Элм, 2004. – 301 с.
4. Мусаев В. Г. Дискретный метод и системно-структурного анализ при решении динамических задач в магистральных трубопроводных системах / В. Г. Мусаев // Вестник машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 29 – 33.
5. Структурный анализ динамических процессов в магистральных нефтепроводах [Электронный ресурс] / Мусаев В. Г. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №1. – 2007. Режим доступа до журн.: http://www.ogbus.ru/authors/Musaev/Musaev_1.pdf.
6. Мамедов Г. А. Структурный анализ динамических процессов в системах с иерархической структурой управления / Г. А. Мамедов, К. Э. Рустамов, В. Г. Мусаев // Изв. НАН Азерб., серия физико-технических и математических наук, том XXVI. – 2006. – № 2. – С. 108 – 113.
7. Диткин В. А. Справочник по операционному исчислению / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – М.: Высшая школа, 1965. – 465 с.

Мусаєв Відаді Гасан огли – д. т. н., доц., завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж, e-mail: musayev_vidadi@mail.ru.

Імамалієв Ельман Бахлул огли – к. т. н., доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж.

Гусейнов Натіг Етібар огли – к. т. н., доцент кафедри прикладної інформатики. Азербайджанський технічний університет.