

М. І. ГОРБІЙЧУК

доктор технічних наук,
професор кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-8586-1883

М. З. ВАСИЛЕНЧУК

аспірант кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0008-9725-052X

СИНТЕЗ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ НАГРІВНИКА НАФТИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

У нафтогазовій промисловості останнім часом стали застосовувати шляхові нагрівники нагрівання нафти (конденсату), у яких на відміну від прямого підігріву димовими газами, забезпечується рівномірне нагрівання продукту, що запобігає появі аномально гарячих ділянок, які можуть бути причиною виникнення аварійних ситуацій – розривів труб, витікання нафти, вибухів.

Для підтримання технологічного процесу – нагріву робочого продукту – в заданих межах використовують локальну систему автоматичного регулювання температури продукту на виході нагрівника. Недоліком такої системи є те, що зовнішні збурення, які діють на об'єкт, враховуються системою за допомогою від'ємного зворотного зв'язку. Оскільки об'єкт має значну інерційність, то опосередковане врахування системою зовнішніх впливів приводить до значного погіршення якості процесу керування.

Створення системи автоматичного керування процесом нагрівання робочого продукту, з підвищеними показниками якості процесу керування, можливе лише на основі математичної моделі, яка описує динаміку передачі тепла від жарових труб через проміжний теплоносій до робочого середовища.

У роботі математична модель нагрівника подана у просторі станів, яка має векторну форму, що дало змогу спростити як процес лінеаризації, так і процес виключення проміжних змінних. Аналіз отриманої моделі показав, що динаміка нагрівача нафти (конденсату) характеризується дев'ятьма передавальними функціями.

Розроблена структурна схема нагрівника стане основою для розроблення системи автоматичного керування шляховим нагрівачем нафти з покращеними показниками якості керування.

Ключові слова: *шляхові нагрівники нафти, простір станів, лінеаризація, передавальні функції, динаміка передачі тепла, система автоматичного регулювання.*

М. І. GORBIYCHUK

Doctor of Engineering,
Professor at the Department of Automation
and Computer-Integrated Technologies
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-8586-1883

М. Z. VASYLENCHUK

Postgraduate Student at the Department of Automation
and Computer-Integrated Technologies
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0008-9725-052X

SYNTHESIS OF THE STRUCTURAL DIAGRAM OF THE OIL HEATER AS AN OBJECT OF AUTOMATIC CONTROL

In the oil and gas industry, oil (condensate) heaters have recently been used, in which, unlike direct heating with flue gases, uniform heating of the product is ensured, which prevents the appearance of abnormally hot areas, which can be the cause of emergency situations – pipe ruptures, oil leaks, explosions.

To maintain the technological process – the heating of the working product – within the given limits, a local system of automatic temperature regulation of the product at the outlet of the heater is used. The disadvantage of such a system is that external disturbances acting on the object are taken into account by the system using negative feedback. Since the object has significant inertia, indirect consideration by the system of external influences leads to a significant deterioration in the quality of the control process.

The creation of a system for automatic control of the process of heating the working product, with increased indicators of the quality of the control process, is possible only on the basis of a mathematical model that describes the dynamics of heat transfer from heat pipes through an intermediate coolant to the working environment.

In the work, the mathematical model of the heater is presented in the state space, which has a vector form, which made it possible to simplify both the process of linearization and the process of excluding intermediate variables. The analysis of the obtained model showed that the dynamics of the oil (condensate) heater is characterized by nine transfer functions.

The developed structural diagram of the heater will be the basis for the development of an automatic control system for the oil path heater with improved control quality indicators.

Key words: oil heaters, state space, linearization, transfer functions, dynamics of heat transfer, automatic control system.

Постановка проблеми

Перед подачею нафти (або конденсату) споживачам, нафту попередньо нагрівають до певної температури. Нагрів нафти здійснюється в апаратах, які представляють собою ємність (ванну), заповненою водою, яка омиває жарові труби. Через жарові труби протікають нагріті продукти згоряння газу, який спалюється в камері згоряння. Тепло від жарових труб передається рідині (воді), яка нагріває пучок труб, через які протікає нафта (конденсат).

Використання ванни з водою забезпечує рівномірне нагрівання продукту та запобігає появі аномально гарячих ділянок, які можуть бути причиною виникнення аварійних ситуацій – розривів труб, витікання нафти, вибухів.

Для підтримання технологічного процесу – нагріву робочого продукту – в заданих межах використовують локальну систему автоматичного регулювання температури продукту на виході нагрівника. Недоліком такої системи є те, що зовнішні збурення, які діють на об'єкт, враховуються системою за допомогою від'ємного зворотного зв'язку. Оскільки об'єкт має значну інерційність, то опосередковане врахування системою зовнішніх впливів приводить до значного погіршення якості процесу керування.

Створення системи автоматичного керування процесом нагрівання робочого продукту, з підвищеними показниками якості процесу керування, можливе лише на основі математичної моделі, яка описує динаміку передачі тепла від жарових труб через проміжний теплоносій до робочого середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для нагрівання нафти або конденсату спалюють попутний або комерційний газ. При видобуванні нафти отримують попутний газ, який не обліковується. На промислах, де видобувають газ, отримують також конденсат, який необхідно відокремити від газу, перед подачею газової суміші до сепараційної установи її нагрівають в шляхових нагрівниках, спалюючи в камерах згоряння комерційний газ.

Тому у більшості робіт, у яких висвітлюються різні аспекти функціонування шляхових нагрівників, ведеться пошук раціонального використання комерційного газу. Так у роботі [1] для дослідження динамічних властивостей нагрівника з проміжним теплоносієм разом з редуційним клапаном створена математична модель, на основі якої сформувані пропозиції щодо підвищення коефіцієнта корисної дії нагрівника. З метою підвищення к. к. д. шляхового нагрівача, який працює у складі газорозподільної станції, у роботі [2] створена математична модель, на основі якої запропоновано нове технічне рішення – оснастити шляховий нагрівач сонячною станцією з водяним акумулятором. Недоліком створеної моделі є те, що вона не враховує динаміку передачі тепла до рідини через стінки жарових труб. Для підвищення к. к. д. нагрівника у роботах [3, 4] запропоновано тепло димових газів використовувати для попереднього підігріву повітря перед подачею його в камеру згоряння. Таке конструктивне рішення дало змогу збільшити к. к. д. нагрівника на 27 % у порівнянні з базовим варіантом. На основі імітаційного моделювання в роботі [5] розроблені рекомендації щодо регулювання довжини факелу полум'я у камері згоряння та по вибору оптимального співвідношення повітря-газ.

Проведений аналіз наукових джерел показує, що дослідники меншу увагу приділяють шляховим нагрівачам нафти, де на нагрівання робочого продукту, використовують попутний газ, який не обліковується і спалюється в факелах.

Дотепер для автоматизації процесу нагрівання нафти (конденсату) використовують одноконтурні системи автоматичного керування [6], які через велику інерційність об'єкта керування, мають незадовільні показники якості процесу керування.

У роботі [7] автори використали імітаційне моделювання шляхового нагрівника для дослідження системи автоматичного регулювання температури на виході редуційного клапану, що запобігає гідроутворенню, яке виникає як результат ефекту Джоуля-Томсона.

Таким чином, не дивлячись на цілий ряд публікацій, присвячених математичному моделюванню різних аспектів роботи шляхових нагрівників, актуальною науковою задачею залишається створення адекватних математичних моделей, які дадуть змогу створити нові системи автоматичного керування процесом нагріву нафти (конденсату) з покращеними показниками якості процесу керування.

Формулювання мети дослідження

Синтезувати лінеаризовану математичну модель шляхового нагрівача з проміжним теплоносієм у просторі станів та визначити його передавальні функції і на цій основі створити структурну схему нагрівача як об'єкта автоматичного керування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Синтез лінеаризованої математичної моделі нагрівника у просторі станів

У роботах [8, 9] отримана математична модель нагрівника з проміжним теплоносієм при таких допущеннях:

- продуктивний теплообмінник і газохід замінюється зосередженою ланкою у якій поверхні обміну, товщина і маса металу стінок відповідають цим же параметрам реальних елементів підігрівника;
- температура середовищ у продуктовому змійовику та газоході дорівнює середній температурі середовищ на вході і виході даних елементів, а у ванні з теплоносієм середньому значенню діапазону паспортних робочих температур;
- передача тепла через поверхні теплообміну продуктового змійовика та від стінки газоходу до теплоносія відбувається шляхом конвекції, а від димових газів до стінки газоходу – радіантним та конвекційним способами;
- тепловий опір теплообмінних стінок дуже малий, тому їх температура в усіх точках однакова;
- густина середовищ і матеріалу стінок є постійною і не залежить від температури.

На основі аналізу нагрівника як об'єкта керування отримані рівняння енергетичного балансу для основних потоків та стінок теплопередачі

$$\tau_n \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = -k_{n,1} G_n (T_n^{out} - T_n^{in}) + k_{n,2} T_{sz}, \tag{1}$$

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + T_w = k_{sdk} T_{sdk} + k_{sz} \cdot T_{sz} \tag{2}$$

$$\frac{dT_{dg\uparrow}}{dt} = \frac{1}{0,5L_1} \left((k_5 - k_1 \cdot T_{dg\uparrow}) \cdot G(U) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 \cdot \left(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk} \right)^{5/4} \right) \tag{3}$$

$$\tau_{sz} \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = k_{wep} T_w + k_{nep} T_{ncp}, \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{sdk}}{dt} = & \frac{1}{M_{dk} \cdot c_{dk}} \left(0,5 \cdot \psi \cdot (\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\epsilon_{dg} \left(\frac{(T_{max} + T_{dg\uparrow})}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + \right. \\ & \left. + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot \sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk})} \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk}) - C_{sdk_w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w) \right), \end{aligned} \tag{5}$$

У рівняннях (1) – (5) прийняті такі позначення: $\tau_n = \frac{M_n \cdot c_n}{C_{sz-n} F_z}$ – постійна часу; $k_{n,1} = \frac{c_n}{C_{sz-n} F_z}$; C_{sz-n} – коефіцієнт теплопередачі від стінки до середовища, що нагрівається; F_z – площа поверхні обміну змійовика; M_n – маса продукту (нафти) у змійовику; G_n – масова витрата нафти; c_n – середня теплоємність нафти; $T_{ncp} = 0,5(T_n^{in} + T_n^{out})$ – середня температура нафти; T_w – температура проміжного теплоносія (води); $\tau_{sz} = \frac{M_z \cdot c_z}{(C_{w_sz} + C_{sz-n}) F_z}$; $k_{wep} = \frac{C_{w_sz}}{C_{w_sz} + C_{sz-n}}$; $k_{nep} = \frac{C_{sz-n}}{C_{w_sz} + C_{sz-n}}$; C_{w_sz} – коефіцієнт теплопередачі від води до стінки; M_z – маса стінки, c_z – теплоємність стінки, Q_{w_sz} – тепловий потік від води до стінки; $T_{dg\uparrow}$ – температура димових газів на виході; $G(U)$ – витратна характеристика регулюючого клапану; $T_{dgp} = 0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow})$; T_{max} – максимальна розрахункова температура горіння, що еквівалентно температурі димових газів в топці; T_{sdk} – температура стінки димового каналу; $L_1 = V_{zdg} \rho_{cpdg} c_{cpdg}$; $k_1 = C_{dg\uparrow} \cdot B_{max} (1 + \alpha L_0)$; $k_2 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \cdot \epsilon_{dg}$; $k_3 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \cdot A_{dg}$; $k_4 = 2,1 \cdot F_{dk}$; $k_5 = B_{max} \cdot \eta_T \cdot q_g^H$; V_{zdg} – об'єм димового каналу нагрівника; ρ_{cpdg} – середня густина димових газів; $c_{cpdg} = 0,5(c_{dg\uparrow}^{\uparrow} + c_{dg\uparrow}^T)$ – середня теплоємність димових газів; $\epsilon_c = 0,85$; $c_{dg\uparrow}^{\uparrow}, c_{dg\uparrow}^T$ – теплоємність продуктів згорання на

виході печі і топки; q_g^H – теплота згорання паливного газу; $\eta_T = 0,95$; $\tau_w = \frac{M_w c_w}{C_{sdk_w} F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$ – постійна часу;
 $k_{sdk} = \frac{C_{sdk_w} F_{dk}}{C_{sdk_w} F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$; $k_{sz} = \frac{C_{w_sz} F_z}{C_{sdk_w} F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$.

Рівняння (1) запишемо у такому вигляді: p

$$\tau_n \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = -k_{n,1} G_n (T_n^{out} + T_n^{in} - 2T_n^{in}) + k_{n,2} T_{sz}.$$

Оскільки $T_{ncp} = \frac{T_n^{out} + T_n^{in}}{2}$, то останнє рівняння буде таким:

$$\frac{dT_{ncp}}{dt} = \frac{1}{\tau_n} (-2k_{n,1} G_n (T_{ncp} - T_n^{in}) - T_{ncp} + T_{sz}). \quad (6)$$

Інші рівняння системи (2) – (5) також подамо у формі Коші

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\tau_w} (k_{sdk} T_{sdk} - T_w + k_{sz} \cdot T_{sz}) \quad (7)$$

$$\frac{dT_{dg\uparrow}}{dt} = \frac{1}{0,5L_1} \left((k_5 - k_1 \cdot T_{dg\uparrow}) \cdot G(U) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 \cdot \left(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk} \right)^{5/4} \right) \quad (8)$$

$$\frac{dT_{sz}}{dt} = \frac{1}{\tau_{sz}} (k_{wep} T_w - T_{sz} + k_{nep} T_{ncp}), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{sdk}}{dt} = \frac{1}{M_{dk} \cdot c_{dk}} & \left(0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{(T_{max} + T_{dg\uparrow})}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + \right. \\ & \left. + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot \sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk})} \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk}) - C_{sdk_w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w) \right), \quad (10) \end{aligned}$$

Вводимо такі позначення:

$$\varphi_1(T_{ncp}, T_{sz}, T_n^{in}, G_n) = \frac{1}{\tau_n} (-2k_{n,1} G_n (T_{ncp} - T_n^{in}) - T_{ncp} + T_{sz}),$$

$$\varphi_2(T_w, T_{sz}, T_{sdk}) = \frac{1}{\tau_w} (k_{sdk} T_{sdk} - T_w + k_{sz} \cdot T_{sz}),$$

$$\varphi_3(T_{dg\uparrow}, T_{sdk}, U) = \frac{1}{0,5L_1} \left((k_5 - k_1 \cdot T_{dg\uparrow}) \cdot G(U) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) \right)^4 + k_3 T_{sdk}^4 - k_4 \cdot \left(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk} \right)^{5/4} \right);$$

$$\pi_1(T_{ncp}, T_w, T_{sz}) = \frac{1}{\tau_{sz}} (k_{wep} T_w - T_{sz} + k_{nep} T_{ncp}),$$

$$\begin{aligned} \pi_2(T_w, T_{dg\uparrow}, T_{sdk}) = \frac{1}{M_{dk} \cdot c_{dk}} & \left(0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{(T_{max} + T_{dg\uparrow})}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + \right. \\ & \left. + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot \sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk})} \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk}) - C_{sdk_w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w) \right). \end{aligned}$$

З врахуванням прийнятих позначень систему рівнянь (6) – (8) запишемо у векторній формі

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{\varphi}(\bullet). \quad (11)$$

Аналогічно, подаємо і рівняння (9) та (10)

$$\frac{d\bar{X}_1}{dt} = \bar{\pi}(\bullet), \quad (12)$$

де $\bar{\varphi}(\bullet) = \begin{bmatrix} \varphi_1(\bullet) \\ \varphi_2(\bullet) \\ \varphi_3(\bullet) \end{bmatrix}$, $\bar{\pi}(\bullet) = \begin{bmatrix} \pi_1(\bullet) \\ \pi_2(\bullet) \end{bmatrix}$ – вектор-функції, компоненти яких праві частин системи рівнянь (1),

(6) – (10).

Лінеаризуємо рівняння (11) і (12)

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta\bar{X})}{dt} = & \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial T_{ncp}}\right)_0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\varphi_2}{\partial T_w}\right)_0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{\partial\varphi_3}{\partial T_{dg}}\right)_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{ncp} \\ \Delta T_w \\ \Delta T_{dg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial T_{sz}}\right)_0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{\partial\varphi_2}{\partial T_{sz}}\right)_0 & \left(\frac{\partial\varphi_2}{\partial T_{sdk}}\right)_0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\varphi_3}{\partial T_{sdk}}\right)_0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{sz} \\ \Delta T_{sdk} \\ 0 \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial T_n^{in}}\right)_0 & \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial G_n}\right)_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_n^{in} \\ \Delta G_n \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \left(\frac{\partial\varphi_3}{\partial U}\right)_0 \end{bmatrix} \Delta U \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{d(\Delta\bar{X}_{iv})}{dt} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\pi_1}{\partial T_{ncp}}\right)_0 & \left(\frac{\partial\pi_1}{\partial T_w}\right)_0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\pi_2}{\partial T_w}\right)_0 & \left(\frac{\partial\pi_2}{\partial T_{dg}}\right)_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{ncp} \\ \Delta T_w \\ \Delta T_{dg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\pi_1}{\partial T_{sz}}\right)_0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\pi_2}{\partial T_{sdk}}\right)_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{sz} \\ \Delta T_{sdk} \\ 0 \end{bmatrix}_{iv} \quad (14)$$

Якщо увести позначення: $\Delta\bar{X} = \begin{bmatrix} \Delta T_{ncp} \\ \Delta T_w \\ \Delta T_{dg} \end{bmatrix}$ – змінні стану об'єкта; $\Delta\bar{X}_{iv} = \begin{bmatrix} \Delta T_{sz} \\ \Delta T_{sdk} \\ 0 \end{bmatrix}$ – проміжні змінні; $\Delta\bar{X}_{in} = \begin{bmatrix} \Delta T_n^{in} \\ \Delta G_n \end{bmatrix}$ –

збурення; $A_x = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial T_{ncp}}\right)_0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\varphi_2}{\partial T_w}\right)_0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{\partial\varphi_3}{\partial T_{dg}}\right)_0 \end{bmatrix}$; $A_{iv} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial T_{sz}}\right)_0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{\partial\varphi_2}{\partial T_{sz}}\right)_0 & \left(\frac{\partial\varphi_2}{\partial T_{sdk}}\right)_0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\varphi_3}{\partial T_{sdk}}\right)_0 & 0 \end{bmatrix}$;

$$A_m = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial T_n^{in}}\right)_0 & \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial G_n}\right)_0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \bar{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \left(\frac{\partial\varphi_3}{\partial U}\right)_0 \end{bmatrix}; A_{\pi,1} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\pi_1}{\partial T_{ncp}}\right)_0 & \left(\frac{\partial\pi_1}{\partial T_w}\right)_0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\pi_2}{\partial T_w}\right)_0 & \left(\frac{\partial\pi_2}{\partial T_{dg}}\right)_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; A_{\pi,2} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\pi_1}{\partial T_{sz}}\right)_0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial\pi_2}{\partial T_{sdk}}\right)_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

то рівняння (13) і (14) будуть такими:

$$\frac{d(\Delta\bar{X})}{dt} = A_x \cdot \Delta\bar{X} + A_{iv} \cdot \Delta\bar{X}_{iv} + A_{in} \cdot \Delta\bar{X}_{in} + \bar{b} \Delta U, \quad (15)$$

$$\frac{d(\Delta\bar{X}_{iv})}{dt} = A_{\pi,1} \cdot \Delta\bar{X} + A_{\pi,2} \cdot \Delta\bar{X}_{iv}. \quad (16)$$

Рівняння (15) і (16) перетворимо за Лапласом при нульових початкових умовах. У результаті отримаємо

$$(sI - A_x) \cdot \Delta\bar{X} = A_{iv} \cdot \Delta\bar{X}_{iv} + A_{in} \cdot \Delta\bar{X}_{in} + \bar{b} \Delta U, \quad (17)$$

$$(sI - A_{\pi,2}) \Delta\bar{X}_{iv} = A_{\pi,1} \cdot \Delta\bar{X}. \quad (18)$$

Із рівняння (17) знаходимо

$$\Delta\bar{X}_{iv} = (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \cdot \Delta\bar{X}.$$

Знайдене значення $\Delta\bar{X}_{iv}$ підставимо в (17), що дасть

$$\left((sI - A_x) - A_{iv} \cdot (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \right) \Delta\bar{X} = A_{in} \Delta\bar{X}_{in} + \bar{b} \Delta U.$$

Звідси

$$\Delta\bar{X} = \left(sI - A_x - A_{iv} \cdot (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \right)^{-1} A_{in} \cdot \Delta\bar{X}_{in} + \left(sI - A_x - A_{iv} \cdot (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \right)^{-1} \bar{b} \Delta U.$$

Відхилення температур від своїх усталених значень позначимо як θ , а відхилення командного сигналу від свого базового значення буде таким: $u = \Delta U$.

З врахуванням прийнятих позначень останнє матрично-векторне рівняння буде таким:

$$\bar{\theta} = \left(sI - A_x - A_{iv} \cdot (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \right)^{-1} A_{in} \cdot \bar{\theta}_{in} + \left(sI - A_x - A_{iv} \cdot (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \right)^{-1} \bar{b} u. \quad (19)$$

Очевидно, що

$$W_{\theta, \theta_{in}}(s) = \left(sI - A_x - A_{iv} \cdot (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \right)^{-1} A_{in}, \quad (20)$$

$$W_{\theta, u}(s) = \left(sI - A_x - A_{iv} \cdot (sI - A_{\pi,2})^{-1} A_{\pi,1} \right)^{-1} \bar{b} \quad (21)$$

матричні передавальні функції вихідної величини $\bar{\theta}$ відносно факторів збурення $\bar{\theta}_{in}$ і керуючої дії u . Отже,

$$\bar{\theta} = W_{\theta, \theta_{in}}(s) \bar{\theta}_{in}(s) + W_{\theta, u}(s) u(s). \quad (22)$$

Рівняння (22) дає змогу побудувати структурну схему нагрівника (рис. 1) як об'єкта автоматичного керування.

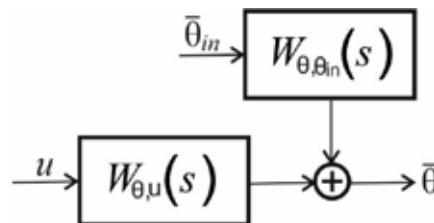


Рис. 1. Структурна схема нагрівника як об'єкта автоматичного керування

З аналізу матричних передавальних функцій $W_{\theta, \theta_{in}}(s)$ і $W_{\theta, u}(s)$ випливає, що опис динамічних властивостей нагрівника, при малих відхиленнях вихідних величин від своїх базових значень, зроблений дев'ятьма передавальними функціями. Відповідно маємо три канали впливу вхідних факторів на вихідні величини. При цьому впливи збурення θ_n^{in} , g_n та керуюча дія u спричиняють реакцію трьох вихідних величин θ_n^{out} , θ_w і θ_{dg} .

Останнє твердження випливає із матрично-векторного рівняння (22), яке подамо у розгорнутій формі

$$\begin{bmatrix} \theta_{ncp}(s) \\ \theta_w(s) \\ \theta_{dg}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{\theta, \theta_n}^{(11)}(s) & W_{\theta, \theta_n}^{(12)}(s) \\ W_{\theta, \theta_n}^{(21)}(s) & W_{\theta, \theta_n}^{(22)}(s) \\ W_{\theta, \theta_n}^{(31)}(s) & W_{\theta, \theta_n}^{(32)}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_n^{in}(s) \\ g_n(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{\theta, u}^{(1)}(s) \\ W_{\theta, u}^{(2)}(s) \\ W_{\theta, u}^{(3)}(s) \end{bmatrix} u(s).$$

Після виконання відповідних дій над матрицями, отримаємо такі рівняння:

$$\theta_{ncp}(s) = W_{\theta, \theta_n}^{(11)}(s)\theta_n^{in}(s) + W_{\theta, \theta_n}^{(12)}(s)g_n(s) + W_{\theta, u}^{(1)}(s)u(s), \tag{23}$$

$$\theta_w(s) = W_{\theta, \theta_n}^{(21)}(s)\theta_n^{in}(s) + W_{\theta, \theta_n}^{(22)}(s)g_n(s) + W_{\theta, u}^{(2)}(s)u(s), \tag{24}$$

$$\theta_{dg}(s) = W_{\theta, \theta_n}^{(31)}(s)\theta_n^{in}(s) + W_{\theta, \theta_n}^{(32)}(s)g_n(s) + W_{\theta, u}^{(3)}(s)u(s). \tag{25}$$

Із рівняння

$$\theta_{ncp}(s) = \frac{\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s)}{2}, \tag{26}$$

яке визначає взаємозв'язок між середньою температурою $\theta_{ncp}(s)$ і температурами на вході $\theta_n^{in}(s)$ та виході $\theta_n^{out}(s)$ нафти із нагрівника, визначимо

$$\theta_n^{out}(s) = 2\theta_{ncp}(s) - \theta_n^{in}(s). \tag{27}$$

Рівняння (23) – (25) і (27) дають змогу створити структурну схему нагрівника нафти (рис. 2), яка деталізує структурну схему, що зображена на рис. 1.

З врахуванням (26) рівняння (23) набуде такого вигляду:

$$\theta_n^{out}(s) = (2W_{\theta, \theta_n}^{(11)}(s) - 1)\theta_n^{in}(s) + 2W_{\theta, \theta_n}^{(12)}(s)g_n(s) + 2W_{\theta, u}^{(1)}(s)u(s). \tag{28}$$

Зауважимо, що рівняння (28) можна отримати із структурної схеми рис. 2, використавши принцип суперпозиції.

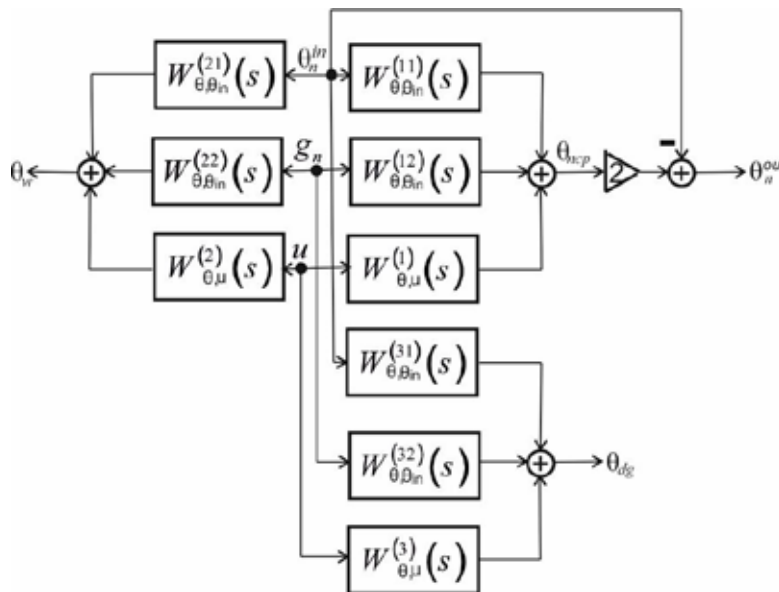


Рис. 2. Структурна схема нагрівника в розгорнутому вигляді

Як видно із рис. 2 керуюча дія u , яка змінює подачу газу в камеру згорання, впливає на температури нафти θ_n^{out} , води θ_w і димових газів θ_{dg} .

Метою керування процесом нагріву в шляховому нагрівнику є підтримання температури нафти на його виході. Реалізація поставленої мети здійснюється за рахунок подачі природного газу в камеру згорання, що тягне за собою зміну температури не тільки на виході нагрівника нафти, але й температури води і димових газів.

Отримана структурна схема нагрівника (рис. 2), як об'єкта автоматичного керування, буде служити основою для створення системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти (конденсату) з врахуванням зовнішніх збурень, що діють на об'єкт.

Висновки

1. Зроблений аналіз математичної моделі шляхового нагрівника нафти (конденсату) дозволив виявити проміжні змінні у системі диференціальних рівнянь, які повинні бути вилучені у подальшому.
2. Подання математичної моделі нагрівника у формі Коші дало змогу перейти до векторної форми її запису і тим самим спростити процес лінеаризації та вилучення проміжних змінних.
3. На основі векторно-матричної форми математичної моделі нагрівача отримані передавальні функції за всіма каналами передачі вхідних величин і виявлено, що опис динамічних властивостей нагрівника виконаний за допомогою дев'ятьох передавальних функцій.
4. Отримана математична модель нагрівника у вигляді передавальних функцій дала змогу створити його структурну схему, на основі якої буде синтезована система автоматичного керування процесом нагрівання нафти (конденсату) з покращеними показниками якості процесу керування.

Список використаної літератури

1. Barreto C.V, Pires Luis F. G., Sarmento R. C. Transient simulation of natural gas citygates stations. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC2010 September 27–October 1, 2010, Calgary, Alberta, Canada. URL: <http://www.simdut.com.br/Trabalhos/IPC2010-31567.pdf>.
2. Rashidmardani A., Hamzei M. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2013. Vol. 2, issue 12. P. 17–25.
3. Azizi S. H., Rashidmardani A., Andalibi M. R. Study of Preheating Natural Gas in Gas Pressure Reduction Station by the Flue Gas of Indirect Water Bath Heater. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2014. Vol. 3, issue 27. P. 17–22. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-32714-03.pdf> ISSN: 2251-8843.
4. Khanmohammadi S., Shahsavari A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). Energy Equip. Sys, 2020. Vol. 8. No. 4. Dec. 2020. P. 349–365. URL: http://www.energyequipsys.com/article_241292_f1fc67b732305a7108c69cf11f6cab0d.pdf.
5. Riahi M., Yazdirad B., Jadidi M., Berenjkar F., Khoshnevisan S., Jamali M., Safary M. Optimization of Combustion Efficiency in Indirect Water Bath Heaters of Ardabil City Gate Stations. MCS 7 Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, September 11–15, 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/272498858_Optimization_of_Combustion_Efficiency_in_Indirect_Water_Bath_Heaters_of_Ardabil_City_Gate_Stations.
6. Розробка та експлуатація нафтових та нафтогазових родовищ: навчальний посібник / Фик М. І., Хріпко О. І., Раєвський Я. О., Варавіна О. П. Харків: «ХПІ», 2019. 149 с.
7. Rastegar S., Kargarsharifabad H., Doost A.K., Rahbar N. Developing a Model for Predicting the Outlet Gas Temperature of Natural Gas Pressure Reduction Stations to Reduce Energy Loss. Journal of Heat and Mass Transfer Research 7, 2020. P. 143–154. URL : https://jhmt.semnan.ac.ir/article_4469_339ae1dfdccab8b200ef6dbcf8e8abfe.pdf.
8. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Гарасимів В. М. Математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. № 2(47). С. 83–96.
9. Горбійчук М. І., Василенчук М. З., Когутяк М. І. Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, 2023. Вип. 3. С. 144–153.

References

1. Barreto C.V, Pires Luis F. G., Sarmento R. C. Transient simulation of natural gas citygates stations. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC2010 September 27–October 1, 2010, Calgary, Alberta, Canada. URL: <http://www.simdut.com.br/Trabalhos/IPC2010-31567.pdf>. DOI: 10.1115/ipc2010-31567.
2. Rashidmardani A., Hamzei M. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2013. Vol. 2, issue 12. P. 17–25.
3. Azizi S. H., Rashidmardani A., Andalibi M. R. Study of Preheating Natural Gas in Gas Pressure Reduction Station by the Flue Gas of Indirect Water Bath Heater. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2014. Vol. 3, issue 27. P. 17–22. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-32714-03.pdf> ISSN: 2251-8843.
4. Khanmohammadi S., Shahsavari A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). Energy Equip. Sys, 2020. Vol. 8. No. 4. Dec. 2020. P. 349–365. URL: http://www.energyequipsys.com/article_241292_f1fc67b732305a7108c69cf11f6cab0d.pdf. DOI: 10.22059/EES.2020.241292
5. Riahi M., Yazdirad B., Jadidi M., Berenjkar F., Khoshnevisan S., Jamali M., Safary M. Optimization of Combustion Efficiency in Indirect Water Bath Heaters of Ardabil City Gate Stations. MCS 7 Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, September 11–15, 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/272498858_Optimization_of_Combustion_Efficiency_in_Indirect_Water_Bath_Heaters_of_Ardabil_City_Gate_Stations. DOI: 10.13140/2.1.1153.8720
6. Development and Operation of Oil and Gas Fields: Textbook / Phyk M. I., Khripko O. I., Raevsky Y. O., Varavina O. P. Kharkiv: «KhPI», 2019. 149 p.

7. Rastegar S., Kargarsharifabad H., Doost A.K., Rahbar N. Developing a Model for Predicting the Outlet Gas Temperature of Natural Gas Pressure Reduction Stations to Reduce Energy Loss. *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 7, 2020. P. 143–154. URL: https://jhmtr.semnan.ac.ir/article_4469_339ae1dfdccab8b200ef6dbcf8e8abfe.pdf.

8. Horbiychuk M. I., Kohutyak M. I., Harasymiv V. M. Mathematical model of heater with intermediate heat carrier. *Quality control methods and devices*. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG, 2021. № 2(47). P. 83–96. DOI: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-83-95

9. Horbiychuk M. I., Vasylenchuk M. Z., Kohutyak M. I. Synthesis of linearized mathematical models of heater with intermediate coolant. *International Scientific and Technical Journal "Measuring and Computing Equipment in Technological Processes"*, 2023, issue. 3, pp. 144–153. DOI:10.31891/2219-9365-2023-75-17