УДК 62-5:681.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.7

М. І. ГОРБІЙЧУК
доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-8586-1883

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

М. І. КОГУТЯК
кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-0026-7744

ІНВАРІАНТНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШЛЯХОВИМ НАГРІВАЧЕМ НАФТИ

Проведений аналіз структурної схеми нагрівника нафти показав, що існує прямий канал – подача газу у камеру згорання – температура нафти на виході нагрівача та канали, по яким поступають збурення – температура нафти на вході в нагрівник і зміна витрати нафти, що поступає в нагрівник.

Запропоновані дві схеми стабілізації температури на виході нагрівника – каскадно-зв'язана і система з ПІ/ПД-регуляторами у прямому контурі керування. Каскадно-зв'язана система автоматичної стабілізації температури на виході нагрівника має у своєму складі два контури – основний і допоміжний. Основний контур утворений прямим каналом «паливний газ-температура на виході», в який включений ПІ-регулятор. Для побудови допоміжного контуру використаний канал «природний газ-температура димових газів», який має значно меншу інерційність ніж основний контур.

Система з ПІ/ПД-регуляторами у своїй структурі має ПІ-регулятор який безпосередньо діє на виконавчий механізм і ПД-регулятор, який включений охоплює від'ємним зворотним зв'язком керований об'єкт.

Порівняльний аналіз двох схемних рішень показав, що другий варіант забезпечує кращі показники якості керування у порівнянні з першим варіантом. Тому другий варіант вибраний як основний. Оскільки на систему автоматичного керування діють збурення, то в роботі запропонована інваріантна система автоматичного керування по відношенню температури нафти і зміна витрати нафти на вході в нагрівник. Виходячи із принципу двоканальності, синтезована структурна схема інваріантної системи та визначені передавальні функції компенсатора.

Для перевірки правильності отриманих рішень у середовищі MatLab/Simulink створена імітаційна модель інваріантної системи автоматичної стабілізації температури на виході нагрівника. При зміні збурень, як функцій часу результати імітаційного моделювання показали, що компенсатори повністю «гасять» змінні в часі збурення.

Ключові слова: *нагрівач нафти, система автоматичне керування, інваріантність, ПІ/ПД-регулятор, якість процесу.*

M. I. HORBIICHUK
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-8586-1883

M. 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

M. I. KOHUTIAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-0026-7744

© Горбійчук М. І., Василенчук М. З., Когутяк М. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

INVARIANT AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR OIL ROAD HEATER

The analysis of the structural diagram of the oil heater showed that there is a direct channel – the supply of gas to the combustion chamber – the oil temperature at the heater outlet, and disturbance channels – the oil temperature at the heater inlet and the change in the flow rate of oil entering the heater.

Two schemes for stabilizing the outlet temperature of the heater are proposed – a cascade-connected system and a system with PI/PD controllers in the direct control loop. The cascade-connected automatic temperature stabilization system at the heater outlet consists of two loops – the main and auxiliary. The main loop is formed by the direct channel "fuel gas–outlet temperature", which includes a PI controller. To build the auxiliary loop, the channel "natural gas–flue gas temperature" is used, which has much lower inertia than the main loop.

The system with PI/PD controllers has a PI controller in its structure that directly acts on the actuator, and a PD controller, which is included in the negative feedback loop of the controlled object.

A comparative analysis of the two schemes showed that the second option provides better control quality indicators compared to the first option. Therefore, the second option was chosen as the main one. Since the automatic control system is subject to disturbances, an invariant automatic control system with respect to the oil temperature and changes in oil flow rate at the heater inlet is proposed. Based on the principle of dual-channeling, the structural diagram of the invariant system was synthesized, and the transfer functions of the compensator were determined.

To verify the correctness of the obtained solutions, a simulation model of the invariant automatic temperature stabilization system at the heater outlet was created in the MatLab/Simulink environment. When disturbances change as functions of time, the simulation results showed that the compensators completely "eliminate" the time-varying disturbances.

Key words: *oil heater, automatic control system, invariance, PI/PD controller, process quality.*

Постановка проблеми

Останнім часом при підготовці нафти і газу до транспортування магістральними трубопроводами, або подачі природного газу споживачам, знайшли своє застосування шляхові нагрівачі нафти і природного газу.

На відміну від прямого нагріву в шляхових нагрівачах передача тепла, яке утворене внаслідок спалювання природного газу в камері згоряння, здійснюється опосередковано через проміжний теплоносій, яким найчастіше виступає вода. Відсутність прямого контакту джерела тепла з нагрівальними трубами, через протікає нафта або природний газ, зменшує ризики аварій

З точку зору автоматичного керування, шляховий нагрівач має значну інерційність, що ускладнює процес синтезу систем керування з високими показниками якості керування. Крім того на об'єкт діють зовнішні збурення – основні з них зміна температури та витрати нафти, яка поступає в нагрівник.

Тому актуальною науковою задачею є пошук нових структурно-параметричних рішень, які дадуть змогу синтезувати систему автоматичного керування процесом нагріву нафти у шляховому нагрівнику з високими показниками якості керування і, яка інваріантна до основних збурень – зміна температури та витрати нафти на вході в нагрівач.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість робіт, у яких висвітлюються питання дослідження властивостей шляхових нагрівачів нафти і газу, зосередженні на питаннях покращення ефективності їх роботи.

Оскільки в таких нагрівачах тепло, отримане від спалювання природного газу, передається робочому тілу (газу або нафті) через проміжний теплоносій, яким найчастіше буває вода, то зусилля дослідників направлені на збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД) нагрівника, який опосередковано залежить від теплопровідності проміжного теплоносія.

Збільшенню теплопровідності проміжного теплоносія (води) присвячена робота [1], у якій досліджували вплив нанотрубок на теплопровідність води. Експерименти проводились на експериментальній установці. До проміжного теплоносія додавали вуглецеві нанотрубки діаметром 20–30 нм, об'ємна частка яких у воді складала 0,025, 0,05, 0,1, 0,2 і 0,3. Результати експерименту показали, що коефіцієнт питомої теплоємності нанофлюїду збільшується з температурою, але не показує істотних змін зі збільшенням об'ємної частки.

У роботі [2] автори досліджували вплив ультразвуку на коефіцієнт теплопровідності води, яка є проміжним теплоносієм у шляхових нагрівачах. Враховуючи складні термофізичні явища, пов'язані з проблемою впливу ультразвуку на процеси передачі тепла через простір заповнений рідиною, для проведення експериментів був використаний лабораторно змодельований ультразвуковий нагрівач. Результати експериментів показали що. максимальне збільшення ультразвукової теплопередачі було оцінено як 166 % при швидкості потоку рідини 0,5 л/хв і потужності нагрівача 200 Вт.

Перед подачею газу споживачам з магістрального трубопроводу відбувається пониження тиску, що спричиняє утворення гідратів внаслідок ефекту Джоуля-Томпсона. Для запобігання такого явища газ попередньо нагрівають в шляхових нагрівачах. За підрахунками авторів роботи [3] ККД таких нагрівачів не перевищує 52 %. Для збільшення ККД у роботі [3, 4] запропоновано використовувати тепло димових газів для підігріву повітря, яке подається в камеру згоряння природного газу.

На основі створення математичної моделі нагрівача природного газу у роботі [5] розв'язана задача визначення технологічних параметрів нагрівача. У створеній моделі враховувано тепло поглинене природним газом,

тепло, передане в навколишнє середовище від труби, і тепло, що втрачається в навколишнє середовище від тіла нагрівача. Таким чином, модель є функцією клімату, геометрії нагрівача та характеристик природного газу, включаючи температуру, тиск і його склад. Проведені розрахунки з використанням створеної моделі дали змогу довести, що зниження температури і підвищення тиску газу на вході, потовщення ізоляції зі скловати і збільшення радіусу жарової труби призвели до збільшення теплового ККД нагрівача з 20 до 60 % і, як наслідок, зменшилася витрата палива нагрівача. Нарешті, вибір відповідної геометрії дав вищу ефективність нагрівача з підвищенням ККД від 44 % до 70 %.

Відмітимо, що створена модель у роботі [5] є статичною і не може бути використана для синтезу системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти (газу) в шляховому нагрівнику.

У цьому контексті слід відмітити роботу [6], в якій запропонована система автоматичного керування температурою на виході нагрівача. Контролер, який входить до складу такої системи, розраховує температуру гідроутворення на виході нагрівача і перераховує її на тиск газу. Інформація з контролера поступає на виконавчий пристрій, який керує подачею палива в камеру згоряння. Запропонована система є одноконтурною. У роботі не досліджені динамічні властивості такої системи і не оцінені показники якості процесу керування. З огляду на то, що шляхові нагрівачі мають значну інерцію, перехідні процеси в такій одноконтурній системі мають значну тривалість [7].

Відмітимо, що дослідження, які проводились різними авторами, направлені, перш за все, вирішення ключової технологічної задачі – підвищення ККД нагрівачів непрямої дії. Значно меншу вагу приділено створенню ефективних систем автоматичного керування процесом нагріву нафти (газу) в шляхових нагрівачах. Задача синтезу високоефективних систем керування шляховими нагрівачами ускладнюється через їх значну інерційність. Крім того об'єкт керування знаходиться під дією зовнішніх збурень, які слід враховувати для покращення якості процесу керування.

Формулювання мети дослідження

Синтез інваріантної системи керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівачі з проміжним теплоносієм відносно збурень – зміна витрати та температури нафти на вході в нагрівач.

Викладення основного матеріалу дослідження

У шляхових нагрівачах нафти тепло, яке утворене згоранням попутного газу в камері згорання, передається до робочого тіла (нафту) через проміжний теплоносій – воду. У воду занурені жарові труби і пучок труб через які протікає нафта.

Наявність водяної бані зумовлює значну інерційність шляхового нагрівача як об'єкта автоматичного керування [7], що спричиняє певні труднощі при синтезі системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти.

Аналіз роботи шляхового нагрівника нафти дав змогу встановити (рис. 1), що вхідною величиною є витрата паливного газу, яка регулюється виконавчим пристроєм за допомогою командного сигналу U. На керований об'єкт (шляховий нагрівник) діють збурення – температура нафти T_n^{in} і зміна витрати нафти G_n на вході в нагрівник. Вихідними величинами об'єкта є температура нафти T_n^{out} на виході із нагрівника і температура T_{dg} димових газів.

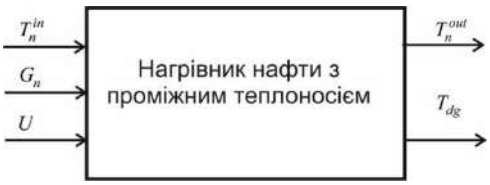


Рис. 1. Функціонально-структурна схема шляхового нагрівника

Для покращення якості процесу керування у роботі [8] запропонована каскадно-зв'язана система автоматичного керування, у якій основним контуром є «подача паливного газу – температура нафти на виході», а додатковий контур утворений сигналом давача температури димових газів. В основний контур керування включений ПІ-регулятор, а в додатковий П-регулятор.

У роботах [9, 10] визначені параметри передавальних функцій за всіма каналами передачі сигналів «вхід-вихід», що дало змогу здійснити комп'ютерне моделювання каскадно-зв'язаної системи керування та визначити показники процесу керування – перерегулювання σ і час регулювання t_c. Отримані такі значення таких показників: σ = 24 %; t_c = 187,9 с.

З метою виявлення можливості покращення якості процесу керування створена інваріантна система автоматичного керування, структурна схема якої зображена на рис. 2. Система має у своєму складі дві підсистеми – стабілізації температури T_n^{out} $(y = T_n^{out})$ на виході нагрівника та компенсації збурень, які діють на об'єкт керування, якими є зміна витрати нафти, що поступає в нагрівник $f_1 = G_n$ та температура нафти на його вході $f_2 = T_n^{out}$.

Підсистема стабілізації температури T_n^{out} складається об'єкта керування з передавальною функцією $W_{ob}(s)$, пропорційна-інтегрального регулятора PI з передавальною функцією $W_{PI}(s)$. Об'єкт керування охоплений місцевим

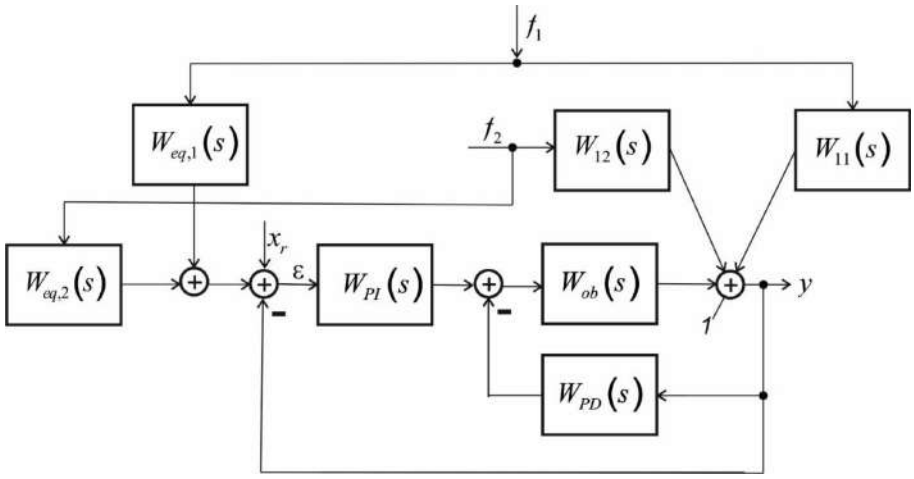


Рис. 2. Структурна схема інваріантної системи керування шляховим нагрівачем

від'ємним зворотним зв'язком, у коло якого включений пропорційно-диференційний регулятор *PD* з передавальною функцією $W_{PD}(s)$.

Підсистему компенсації утворюють канали поширення збурень, які характеризуються передавальними функцією $W_{11}(s)$ і $W_{12}(s)$ та компенсатори збурень з передавальними функціями $W_{eq,1}(s)$ та $W_{eq,2}(s)$.

Виходячи із принципу суперпозиції, створена математичну модель інваріантної системи автоматичного керування (рис. 2)

$$Y(s) = W_{yx_r}(s)X_r(s) + W_{yf_1}(s)F_1(s) + W_{yf_2}(s)F_2(s), \tag{1}$$

де $W_{yx_r}(s)$ – передавальна функція підсистеми стабілізації температури T_n^{out} відносно вставки *PI*-регулятору; $W_{yf_1}(s)$ і $W_{yf_2}(s)$ – передавальні функції підсистеми компенсації збурення.

Синтез підсистеми стабілізації температури здійснений в роботі [11]. Метою синтезу було визначення параметрів налаштування ПІ- та ПД-регуляторів (рис. 2).

Алгоритм розрахунку параметрів налаштування ПІ- та ПД-регуляторів розроблений з використанням комбінованого методу [12]. Передавальні функції ПІ- та ПД-регуляторів були такими:

$$W_{PI}(s) = \frac{C_0^{(1)}s + C_1}{s}, \qquad W_{PD}(s) = C_0^{(2)}s + C_2. \tag{2}$$

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, були визначені параметри $C_0^{(1)}$, $C_0^{(2)}$, C_1 і C_2 налаштування ПІ- та ПД-регуляторів, а також показники якості процесу керування. Результатом розрахунків є такі значення: $C_0^{(1)} = 1{,}1506 \cdot 10^3$, $C_0^{(2)} = 3{,}7738 \cdot 10^2$, $C_1 = 18{,}427$, $C_2 = 2{,}7357 \cdot 10^4$; $t_c = 58{,}5$ с, перерегулювання – відсутнє.

Отже, запропонований в роботі [11] структурно-параметричний синтез підсистеми стабілізації дав змогу зменшити час регулювання в 3.2 рази у порівнянні з каскадно-зв'язаною системою керування при відсутності перерегулювання.

Підсистема компенсації збурень (рис. 2) повинна забезпечити інваріантність вихідної координати системи *y* по відношенню до збурень f_1 і f_2. Це означає, що другий і третій доданки у правій частині рівняння (1) повинен перетворитись в нуль. Оскільки $f_1 \neq 0$ і $f_2 \neq 0$, то умови рівності нулю складових $W_{yf_1}(s)F_1(s)$ і $W_{yf_2}(s)F_2(s)$ в формулі (1) будуть мати місце тоді, коли $W_{yf_1}(s) = 0$ і $W_{yf_2}(s) = 0$. Виконання останніх умов забезпечується певним вибором $W_{eq_1}(s)$ і $W_{eq_2}(s)$ – передавальних функцій компенсаторів (рис. 2).

Для розв'язання поставленої задачі необхідно визначити передавальні функцію $W_{yf_1}(s)$ і $W_{yf_2}(s)$. Для цього перенесемо суматор 1 через передавальну функцію $W_{ob}(s)$. Результат такого структурного перетворення зображений на рис. 3.

Внаслідок структурного перетворення (рис. 3) передавальні функції $W_{F,1}(s)$ і $W_{F,2}(s)$ будуть такими: $W_{F,1}(s) = \dfrac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)}$ і $W_{yf,2}(s) = \dfrac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)}$.

Якщо скористатись принципом суперпозиції, то $W_{yf_1}(s)$ визначимо із рис. 3, поклавши у ньому $x_r = 0$ і $f_2 = 0$, а для визначення $W_{yf_2}(s)$ необхідно прирівняти до нуля величини $x_r = 0$ і $f_1 = 0$. У результаті отримаємо структурні схеми, які зображені на рис. 4.

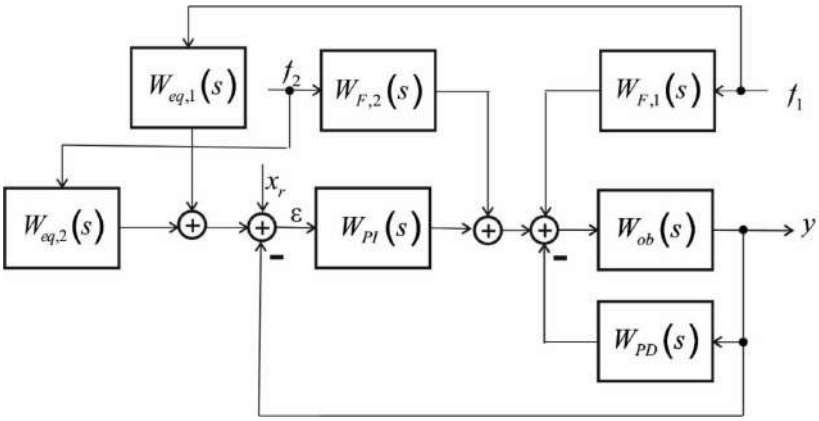


Рис. 3. Структурна схема інваріантної системи керування шляховим нагрівником після структурних перетворень

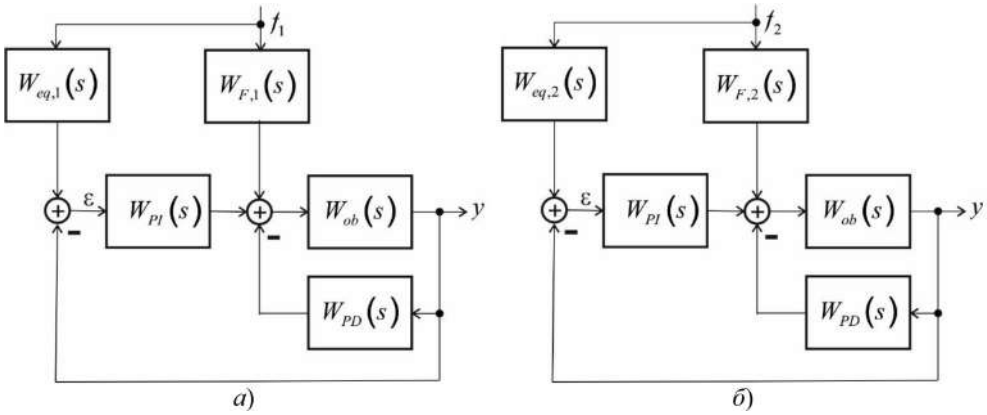


Рис. 4. Структурні схеми інваріантної системи керування (*а*, $x_r = 0$ і $f_2 = 0$; *б*, $x_r = 0$ і $f_1 = 0$)

Після перенесення суматорів за ходом сигналу через передавальну функцію $W_{PI}(s)$ (рис. 4) та після нескладних структурних перетворень, прийшли до структурних схеми, які зображені на рис. 5. Передавальні функції $W_{f,1}(s)$ і $W_{f,2}(s)$ (рис. 4) є такими: $W_{f,1}(s) = \dfrac{W_{F,1}(s)}{W_{PI}(s)}$ і $W_{f,2}(s) = \dfrac{W_{F,2}(s)}{W_{PI}(s)}$.

З врахуванням значень $W_{F,1}(s)$ і $W_{F,2}(s)$, маємо: $W_{f,1}(s) = \dfrac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}$, $W_{f,2}(s) = \dfrac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}$.

Із структурної схеми, яка зображена на рис. 5, *а* знаходимо:

$$W_{yf,1}(s) = (W_{f,1}(s) + W_{eq,1}(s))\frac{W_{PI}(s)W_1(s)}{1 + W_{PI}(s)W_1(s)},$$

а із рис. 5, *б* маємо:

$$W_{yf,2}(s) = (W_{f,2}(s) + W_{eq,2}(s))\frac{W_{PI}(s)W_1(s)}{1 + W_{PI}(s)W_1(s)},$$

де $W_1(s) = \dfrac{W_{ob}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s)}$.

Беручи до уваги величини $W_{f,1}(s)$, $W_{f,2}(s)$ і $W_1(s)$ приходимо до такого результату:

$$W_{yf,1}(s) = \frac{W_{11}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,1}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s) + W_{PI}(s)W_{ob}(s)}, \tag{3}$$

$$W_{yf,2}(s) = \frac{W_{12}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,2}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s) + W_{PI}(s)W_{ob}(s)}. \tag{4}$$

Оскільки умова інваріантності передбачає рівність нулю передавальних функції $W_{yf_1}(s)$ і $W_{yf_1}(s)$, то із формули (3) і (4) випливає, що $W_{11}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,1}(s)W_{PI}(s) = 0$ і $W_{12}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,2}(s) = 0$.

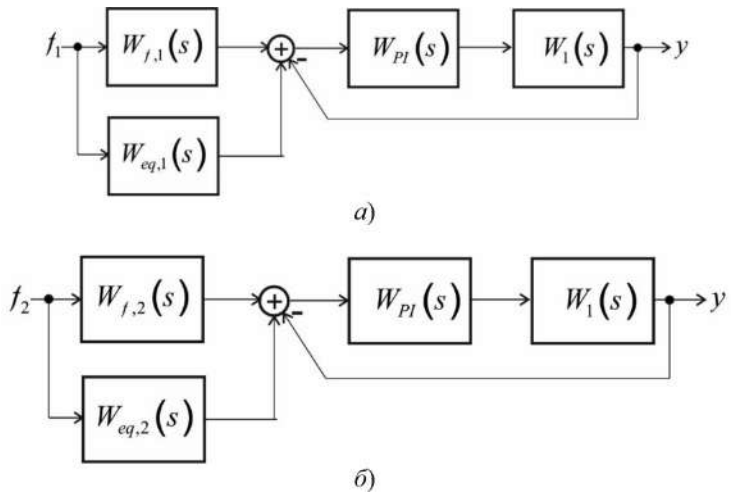


Рис. 5. Структурні схеми інваріантної системи після перетворень: *а*) $x_r = 0$ і $f_2 = 0$; *б*) $x_r = 0$ і $f_1 = 0$

Із останніх рівнянь знаходимо передавальні функції компенсаторів

$$W_{eq,1}(s) = -\frac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}, \tag{5}$$

$$W_{eq,2}(s) = -\frac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}. \tag{6}$$

Так як передавальна функція $W_{PI}(s)$ визначена формулою (3), то

$$W_{eq,1}(s) = -\frac{\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3} \cdot \frac{(\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2)s}{k_s(C_0^{(1)} s + C_1)}, \tag{7}$$

$$W_{eq,2}(s) = -\frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \cdot \frac{(\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2)s}{k_s(C_0^{(1)} s + C_1)}. \tag{8}$$

Оскільки поліноми чисельників передавальних функцій (7) і (8) більші за їх знаменників, то компенсатори *Eq*,1 і *Eq*,2 (рис. 2) фізично нездійсненні. Тому для фізичної реалізації компенсаторів *Eq*,1 і *Eq*,2 необхідно понизити порядки поліномів чисельників передавальних функцій (7) і (8).

Таке зменшення поліномів чисельників передавальних функцій (7) і (8) здійснимо, виходячи із умови близькості частотних характеристик вихідних і редукованих передавальних функцій, які входять до складу виразів (5) і (6). Діапазон частот для відповідних передавальних функцій із формул (5) і (6) повинен належати діапазону частот $\omega \in [0; \omega_{cf}]$, де ω_{cf} – частота зрізу керованого об'єкта, з передавальною функцією $W_{ob}(s)$ (рис. 2).

На рис. 6 зображена частотна характеристика керованого об'єкта, із якого випливає, що $\omega_{cf} = 10^{-3}$ с$^{-1}$.

За методом площ [13] у формулі (5) була редукована передавальна функція $W_{11}(s)$, а у формулі (6) – $W_{ob}(s)$. Результати редукції передавальних функцій $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$ відображає рис. 7.

Із рис. 7 видно, що в діапазоні частот $\omega \in [0; \omega_{cf}]$ є задовільне наближення частотних характеристик вихідних і редукованих моделей, які представлені передавальними функціями $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$.

Отже, отримали такі редуковані моделі:

$$W_{11}^{(r)}(s) = \frac{k}{\pi_0^{(r)} s^2 + \pi_1^{(r)} s + \pi_2^{(r)}},$$

$$W_{ob}^{(r)}(s) = \frac{k_{ob}}{\alpha_0^{(r)} s + \alpha_1^{(r)}}.$$

Тепер для отримання передавальних функцій компенсатора необхідно в (5) і (6) $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$ замінити на $W_{11}^{(r)}(s)$ і $W_{ob}^{(r)}(s)$. У результаті отримали такі передавальні функції компенсаторів:

$$W_{eq,1}(s) = \frac{b_{eq,1}^{(0)} s^3 + b_{eq,1}^{(1)} s^2 + b_{eq,1}^{(2)} s + b_{eq,1}^{(3)}}{a_{eq,1}^{(0)} s^3 + a_{eq,1}^{(1)} s^2 + a_{eq,1}^{(2)} s + a_{eq,1}^{(3)}}, \tag{9}$$

$$W_{eq,2}(s) = \frac{b_{eq,2}^{(0)} s^4 + b_{eq,2}^{(1)} s^3 + b_{eq,2}^{(2)} s^2 + b_{eq,2}^{(3)} s + b_{eq,2}^{(4)}}{a_{eq,2}^{(0)} s^4 + a_{eq,2}^{(1)} s^3 + a_{eq,2}^{(2)} s^2 + a_{eq,2}^{(3)} s + a_{eq,2}^{(4)}},$$

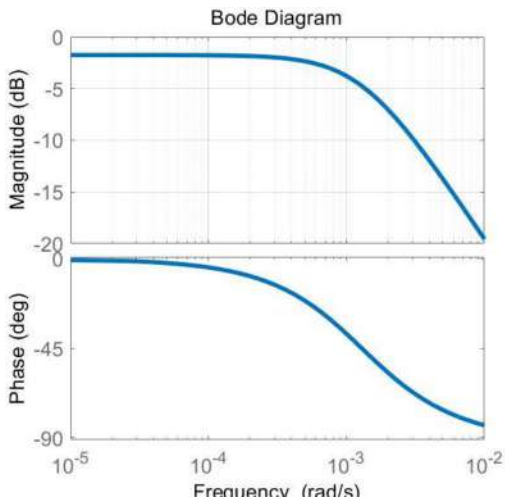


Рис. 6. Частотні характеристики керованого об'єкта

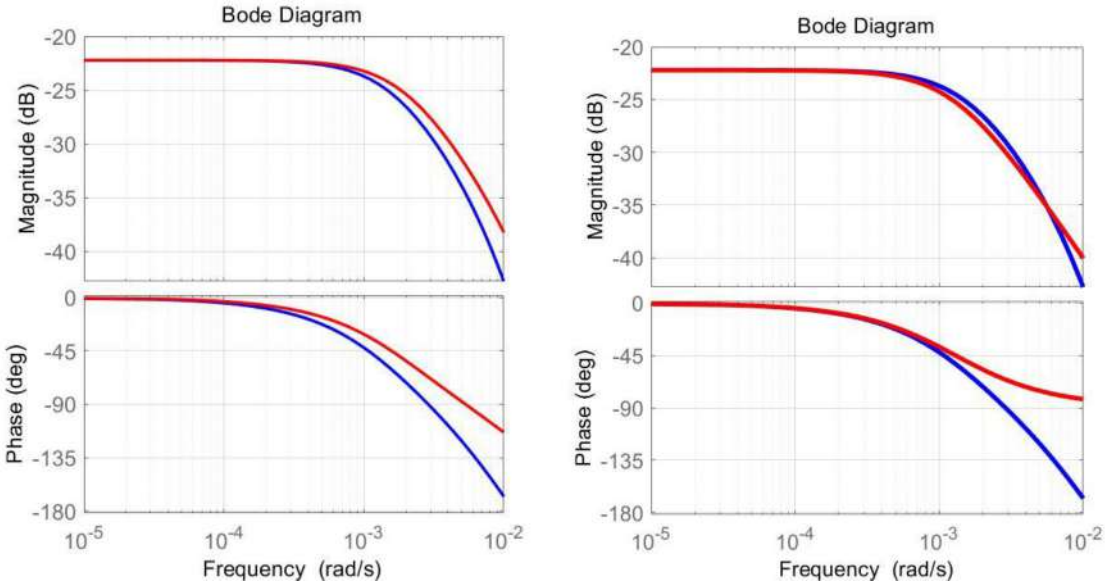


Рис. 7. Частотні характеристики «оригінальних» і редукованих передавальних функцій $W_{11}(s)$ (*а*) і $W_{ob}(s)$(*б*)

де $b_{eq,1}^{(0)} = 1.3387$, $b_{eq,1}^{(1)} = 7.3190 \cdot 10^{-1}$, $b_{eq,1}^{(2)} = 9.4824 \cdot 10^{-4}$, $b_{eq,1}^{(3)} = 0$, $a_{eq,1}^{(0)} = 77.898$ $a_{eq,1}^{(1)} = 1.6997$ $a_{eq,1}^{(2)} = 8.3925 \cdot 10^{-3}$ $a_{eq,1}^{(3)} = 1.8427 \cdot 10^{-5}$; $b_{eq,2}^{(0)} = 7.2830 \cdot 10^{4}$, $b_{eq,2}^{(1)} = 3.7804 \cdot 10^{3}$, $b_{eq,2}^{(2)} = 5.1579$, $b_{eq,2}^{(3)} = 4.3420 \cdot 10^{-4}$, $b_{eq,2}^{(4)} = 0$, $a_{eq,2}^{(0)} = 9.4835 \cdot 10^{3}$, $a_{eq,2}^{(1)} = 8.4643 \cdot 10^{2}$, $a_{eq,2}^{(2)} = 17.073$, $a_{eq,2}^{(3)} = 9.5387 \cdot 10^{-2}$, $a_{eq,2}^{(4)} = 1.5038 \cdot 10^{-6}$.

Перевірку працездатності синтезованої інваріантної системи здійснено шляхом імітаційного моделювання в середовищі MatLab/Simulink (рис. 8).

Необхідні дані для моделювання взяті із роботи [9].

Передавальна функція по каналу «температура нафти на виході – командний сигнал виконавчого пристрою»

$$W_{ob}(s) = \frac{k_s}{\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2},$$

де $\alpha_1 = 771{,}85$, $\alpha_2 = 1$; $k_s = 8{,}173 \cdot 10^{-1}$.

Передавальна функція по каналу «зміна витрати нафти на вході – температура нафти на виході»

$$W_{11}(s) = \frac{\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}$$

«температура нафти на вході – температура нафти на виході»

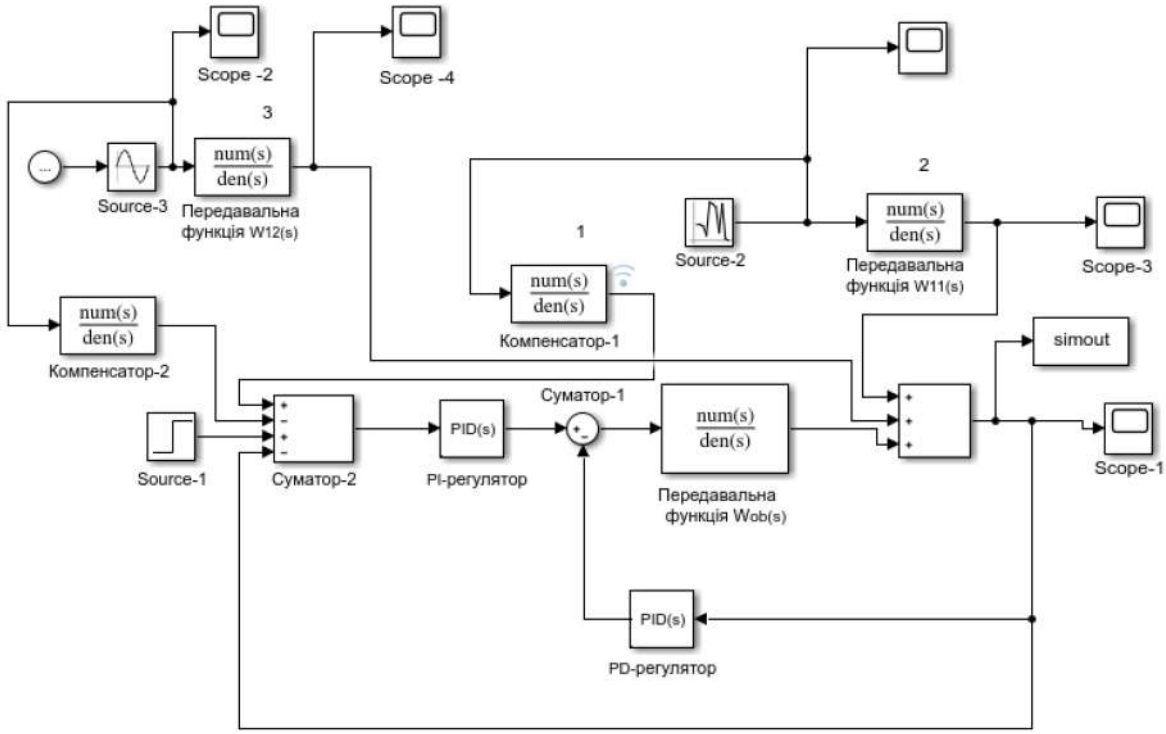


Рис. 8. Графічна модель інваріантної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику

$$W_{12}(s) = -\frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3},$$

де $b_0 = 9.443 \cdot 10^4$, $b_1 = 4823$, $b_2 = 0{,}4342$; $a_0 = 1.010 \cdot 10^8$, $a_1 = 7{,}397 \cdot 10^6$, $a_2 = 6{,}337 \cdot 10^4$, $a_3 = 1$; $\beta_0 = -9{,}195 \cdot 10^5$, $\beta_1 = -5.242 \cdot 10^4$, $\beta_2 = 152{,}4$, $\beta_3 = 1{,}001$; $\pi_0 = 9{,}195 \cdot 10^5$, $\pi_1 = 6{,}905 \cdot 10^4$, $\pi_2 = 730{,}1$, $\pi_3 = 1$.

Графічна модель інваріантної системи (рис. 8), створена у відповідності із структурною схемою, яка зображена на рис. 2.

На вхід моделі подавались сигнали із блоків Source-1 і Source-2. Блок Source-1 реалізував таку стрибкоподібну функцію: $x_r = 50 \cdot 1(t)$. За допомогою блока Source-2 на другий вхід моделі подавалось збурення у вигляді синусоїдальної функції – $f(t) = A \sin(\omega t)$, де $A = 100$, $\omega = 0{,}5$ с$^{-1}$. Таке значення амплітуди A зумовлено значною інерційністю каналу передачі збурення з входу об'єкта на його вихід. Графіки сигналів на вході і виході блоку $W_{yf_1}(s)$, зображені на рис. 9.

Синусоїдальна форма сигналу $f_i(t)$, $i = 1, 2$ вибрана з метою демонстрації інваріантності системи до збурення, яке постійно змінюється в часі. При проходженні сигналу $f_i(t)$, $i = 1, 2$, наприклад, через блок 2 (рис. 8) відбувається зміна його амплітуди в часі (рис. 9, *б*), яка зумовлена динамічними властивостями блоку 2.

Імітаційне моделювання проводили за таким планом. При значенні $f_i(t)$, $i = 1, 2$ – збурення відсутнє – за допомогою створеної Simulink-моделі (рис. 8) отримали графік перехідного процесу; потім подали на вхід блоків 2 і 3 збурення $f_i(t) = A_i \sin(\omega_i t)$, $i = 1, 2$ і зафіксували графік перехідного процесу. У першому і другому дослідженні x_r залишалось незмінним.

Другий комп'ютерний експеримент здійснений шляхом подачі випадкового гаусівського процесу на вхід блоків 2 і 3. На рис. 10, *а*, як приклад, зображений сигнал, який поступав на вхід блоку 2, а на рис. 10, *б* зображений сигнал на його виході.

Результат імітаційного моделювання інваріантної системи автоматичного керування відображено на рис. 11.

Аналіз результатів імітаційного моделювання показали, що наявність контурів передач збурень по каналах, які включають компенсатори $W_{eq,1}(s)$ і $W_{eq,2}(s)$, забезпечують інваріантність системи по відношення до збурень – зміна витрати подачі нафти в шляховий нагрівач і температура на його вході. Ілюстрацією такого твердження є рис. 8, на якому зображені перехідні характеристики інваріантної системи для двох випробувань. У першому випробуванні відсутні збурення, а в другому – збурення у вигляді синусоїдальної функції та випадкового гаусового процесу, які діяли на систему.

Отримані перехідні характеристики демонструють високу ступінь співпадіння, що свідчить про інваріантність системи при змінному в часі сигналів і $f_2(t)$.

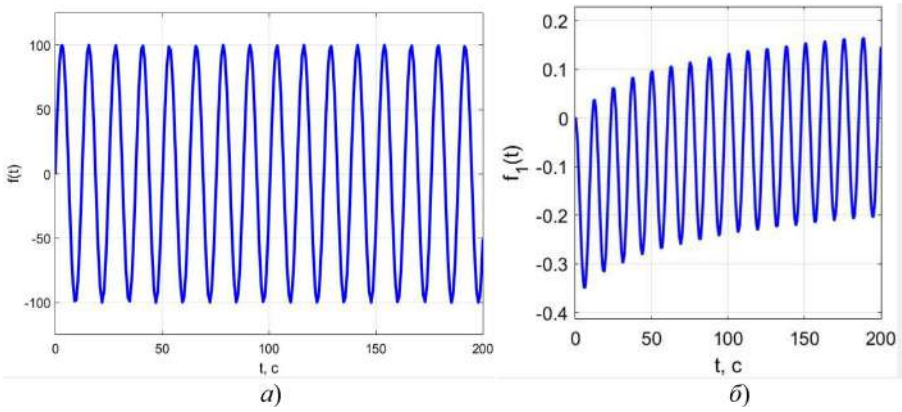


Рис. 9. Сигнали на вході (а) і виході (б) блоку 2 з передавальною функцією $W_{yf_1}(s)$

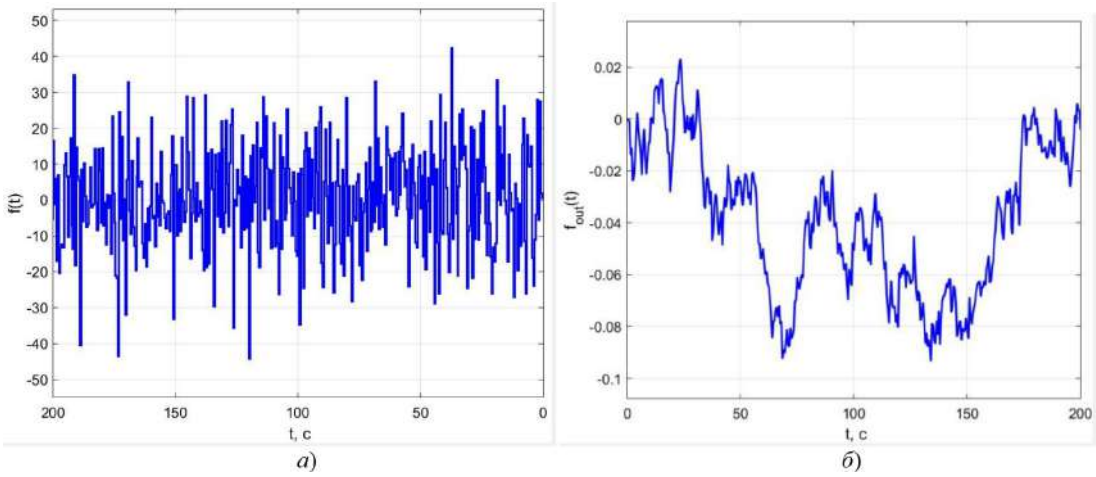


Рис. 10. Випадкові сигнали на вході (*а*) і виході (*б*) блоку 2 з передавальною функцією $W_f(s)$

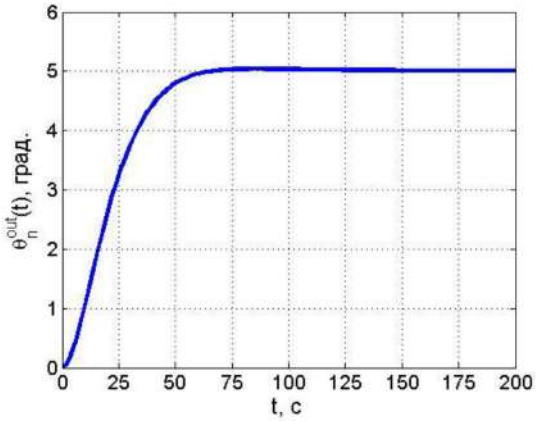


Рис. 11. Результат імітаційного модулювання інваріантної системи автоматичного керування

Для практичної реалізації коректорів необхідно перейти у дискретну форму (10) і отримаємо передавальні функції $H_{eq.1}(z)$, $H_{eq.2}(z)$.

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} c_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} d_k z^{-k}}. \tag{10}$$

Слід відмітити, що для отримання стійкого представлення необхідно правильно підібрати крок квантування t_0. Для розглянутих каналів впливу за крок квантування можна прийняти t_0 = 1 с, що дозволить зсунути полюси

коректорів від межі одиничного кола і цим забезпечити стабільність реалізації цифрового еквівалента коректора з врахуванням одинарної точності розрахунків.

В результаті перетворень знайдемо наступні передавальні функції в дискретній області:

$$H_{eq.1}(z)=\frac{2.207\cdot10^{-2}-5.69\cdot10^{-2}z^{-1}+4.76\cdot10^{-2}z^{-2}-1.277\cdot10^{-2}z^{-3}}{1-2.978z^{-1}+2.957z^{-2}-0.9784z^{-3}};\tag{11}$$

$$H_{eq.2}(z)=\frac{7.68-30.33z^{-1}+44.91z^{-2}-29.56z^{-3}+7.292z^{-4}}{1-3.913z^{-1}+5.74z^{-2}-3.742z^{-3}+0.9146z^{-4}}.$$

Співвідношення вхід/вихід лінійної дискретної системи (ЛДС) однозначно пов'язане з його основною характеристикою в Z-області – передавальною функцією і має вигляд лінійного математичного перетворення у вигляді різницевого рівняння (РР):

$$y(n)=\sum_{i=0}^{N-1}c_i x(n-i)-\sum_{k=1}^{M-1}d_k y(n-k),\tag{12}$$

де c_i, d_k – раціональні коефіцієнти РР – параметри ЛДС; i, k – значення затримок впливу та реакції; $(N-1)$, $(M-1)$ – константи, що визначають максимальні затримки.

Можна реалізувати цифровий коректор декількома способами:

– пряма реалізація за різницевим рівнянням (12), для невисоких порядків коректора;
– розклад в каскадну форму з використанням множників другого порядку;
– представлення в паралельну форму з використанням доданків першого та другого порядку.

Розглянемо варіант представлення (11) добутком множників другого порядку:

$$H(z)=\prod_{k=1}^{L}\frac{c_{0k}+\tilde{c}_{1k}z^{-1}+\tilde{c}_{2k}z^{-2}}{1+d_{1k}z^{-1}+d_{2k}z^{-2}},\tag{13}$$

де $c_{0k},\tilde{c}_{1k},\tilde{c}_{2k},d_{1k},d_{2k}$ – раціональні коефіцієнти рекурсивних ланок 2-го порядку, які називають біквадратними; L – кількість ланок, рівна

$$L=\mathrm{int}\left(\frac{M-1}{2}\right),$$

де *int* – функція округлення до найближчого цілого у бік збільшення.

Каскадній структурі з біквадратних ланок відповідає подання передавальної функції у вигляді залежності (13):

$$H(z)=G\prod_{k=1}^{L}\frac{1+c_{1k}z^{-1}+c_{2k}z^{-2}}{1+d_{1k}z^{-1}+d_{2k}z^{-2}},\tag{14}$$

$G = c_{01}\cdot c_{02}\cdot\ldots\cdot c_{0L}$ – коефіцієнт підсилення, а відповідні коефіцієнти пов'язані співвідношеннями: $c_{1k}=\tilde{c}_{1k}/c_{0k}$; $c_{2k}=\tilde{c}_{2k}/c_{0k}$.

Результати розкладу на секції передавальних функцій коректорів (11) представлені в табл. 1.

Для автоматизації шляхового підігрівника нафти вибрано PLC **Modicon M172** із оновленої лінійки контролерів **M171/M172/M173** компанії *Schneider Electric*, які застосовують для керування HVAC системами (опалення, вентиляція, кондиціювання), комерційними машинами та іншим технологічним обладнанням середньої складності. Контролер з модулями розширення може підтримувати до 238 аналогових та дискретних входів/виходів, має широку номенклатуру інтерфейсів (CAN, RS485 та Ethernet), та вбудований дисплей. Все це дозволяє легко апаратно інтегрувати його в комп'ютерно інтегровані системи керування на промислах. Для програмування PLC M172 застосовують всі п'ять стандартизованих мови програмування міжнародного стандарту *IEC 61131-3*.

Аналіз програмної реалізації типових схем компенсаторів на базі різницевих рівнянь показує, що для цього необхідні певні базові алгоритми у арсеналі PLC, а саме: багатоканальних суматорів, блоки множення та ланцюжки буферних елементів запам'ятовування для вхідних та вихідних сигналів (зсувні регістри типу FIFO). В бібліотеці базових алгоритмів PLC M172 відсутні функціональні блоки зсувних регістрів FIFO, що ускладнює пряму реалізацію коректора.

Однак інтегроване середовище розробки PLC EcoStruxure Machine Expert-HVAC підтримує можливість розробляти потрібний алгоритм високорівневою мовою ST, або використовувати її для програмування власних блоків користувача.

Тому для реалізації каскадної структури коректора з біквадратних ланок доцільно створити власний функціональний блок користувача. З кожним заданим періодом квантування у функціональному блоці підраховується вихід секції за рівнянням (15) та запам'ятовуються в регістрах FIFO попередні значення входів та виходів з відповідним зсувом.

$$y(n) = G\cdot(c_0x(n) + c_1x(n-1) + c_2x(n-2) - d_1y(n-1) - d_2y(n-2)).\tag{15}$$

Таблиця 1

Параметри представлення $H_{eq.1}(z)$ та $H_{eq.2}(z)$ біквадратними секціями

Секція, k	c_{0k}	c_{1k}	c_{2k}	d_{0k}	d_{1k}	d_{2k}
Коректор $H_{eq.1}(z)$, $G_{eq.1} = 2.2068e-02$						
1	1	–0.5796	0	1	–0.9841	0
2	1	–1.9987	0.9987	1	–1.9942	0.9942
Коректор $H_{eq.2}(z)$, $G_{eq.2} = 7.6797$						
1	1	–1.9508	0.9508	1	–1.9227	0.9237
2	1	–1.9986	0.9986	1	–1.9901	0.9901

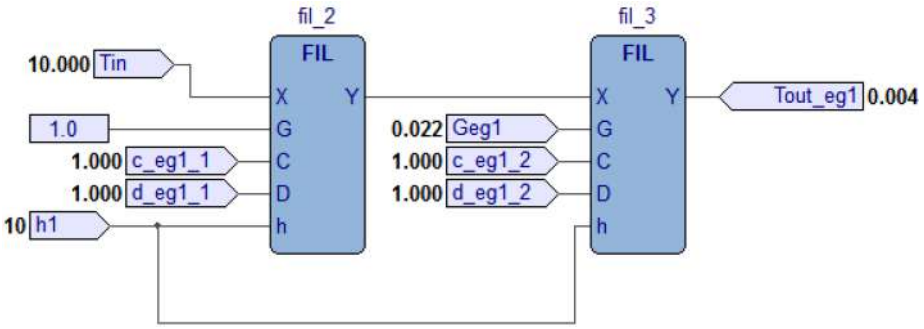
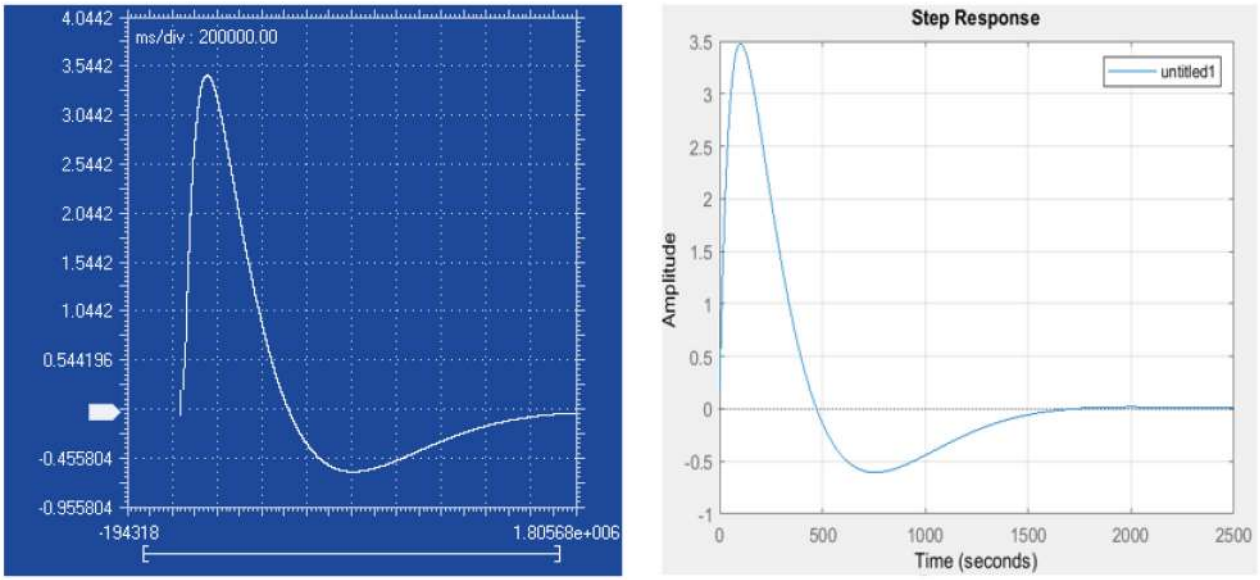


Рис. 12. Реалізація та перевірка роботи коректора $H_{eq.1}(z)$

Функціональний блок секції *FIL* програмно реалізований текстовою мовою *ST*. Входами блоку є відповідні матриці коефіцієнтів *C* і *D* та підсилення каналу *G*. Оскільки такт роботи контролера $0.1c$, а підрахунки в секції треба виконувати з періодом квантування $1c$ введено ще один вхід за яким відслідковується кратність тактів контролера. В секції реалізовано також регістри *FIFO* для змінних *x* та *y* у вигляді векторів

$$X\{x[0.1nh], x[0.1(n-1)h], x[0.1(n-2)h]\}, \quad Y\{y[0.1nh], y[0.1(n-1)h], y[0.1(n-2)h]\}.$$

Коректор відтворений графічною мовою *FBD* (рис. 12) і складається з послідовно включених екземплярів розробленого блоку *FIL*. На вхід першого блоку fil_2 подаються необхідні параметри для першої секції коректора $H_{eq.1}(z)$ (табл. 1). До входу *X* підведене каліброване цифрове значення від давача контрольованої температури нафти на вході підігрівника. Давач підключений до апаратного модуля аналогового входу. Константа на вході $G = 1$. Змінна $h1 = 10$ відповідає за такт роботи коректора з періодом 1 с.



а) б)

Рис. 13. Результати тестування роботи коректора $H_{eq.1}(z)$: *а*) – цифрова реалізація коректора на PLC M172; б) – реалізація в неперервній області

Екземпляр функціонального блоку fil_3 реалізує другу біквадратну секцію коректора з набором відповідних параметрів. Змінна *Geg*1 рівна коефіцієнту посилення коректора. Вихідна змінна *Tout_eg1* є коригуючим сигналом для компенсації впливу зміни параметра *Tin* на систему регулювання температури нафти.

Результати тестування роботи коректора з використанням ***Oscilloscope*** середовища розробки EcoStruxure Machine Expert – HVAC показана на рис. 13.

Аналогічно програмно реалізований цифровий коректор $H_{eq.2}(z)$. Відповідні параметри треба підібрати з табл. 1, а на вхід коректора необхідно подати цифровий еквівалент сигналу від давача витрати нафти на вході у підігрівник.

Висновки

1. З метою зменшення впливу збурень – зміна витрати і температури нафти на вході шляхового нагрівача на ефективність роботи системи автоматичної стабілізації температури, синтезовано інваріантну систему, яка складається з двох підсистем, а саме підсистеми стабілізації температури та підсистеми компенсації збурень.

2. Виходячи із принципу двоканальності, синтезовані компенсатори, які включений в коло компенсації збурень та визначені їх передавальні функції.

3. Створена імітаційна модель у середовищі Matlab/Simulink інваріантної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику дала змогу довести правильність прийнятих структурних рішень. Результати імітаційного моделювання показали, що відбувається повна компенсація збурень навіть при змінних в часі величин перешкод, що діють на вході об’єкта.

4. Синтезовано цифрові моделі коректорів та представлено варіант реалізації з використанням створеного функціонального блоку біквадратної секції на промисловому контролері M172 компанії *SCHNEIDER ELECTRIC*.

Список використаної літератури

1. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 134. P. 107–117. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111

2. Delouei A. A., Naeimi H., Sajjadi H., Atashafrooz M., Imanparast M., Chamkha A. J. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling. Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 237. P. 121795. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121795

3. Rashidmardani A., Hamzehei 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, No. 12. P. 17–24. URL: https://www.ijsei.com/papers/ijsei-21213-04.pdf

4. Khanmohammadi S., Shahsavar A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). Energy Equipment and Systems. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 349–365. DOI: https://doi.org/10.22059/ees.2020.241292

5. Mostafavi S. A., Shirazi M. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. Energy. 2020. Vol. 212. P. 118390. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118390

6. Ebrahimi-Moghadam A., Deymi-Dashtebayaz M., Jafari H., Niazmand A. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 141, No. 6. P. 2573–2588. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-020-09413-4

7. Василенчук М., Горбійчук М., Когутяк М. Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм. Measuring and computing devices in technological processes. 2023. № 3. С. 144–153. DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17

8. Горбійчук М., Василенчук М., Когутяк М. Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. № 4. С. 314–331. DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-39

9. Horbiichuk M. I., Vasylenchuk M. Z., Kohutiak M. I. Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2024. No. 6. P. 151–157. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/151

10. Горбійчук М., Василенчук М. Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об’єкта автоматичного керування. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. Т. 4(87). С. 44–52. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5

11. Василенчук М., Горбійчук М. Структурно-параметричний синтез системи автоматичного керування шляховим нагрівником нафти. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. Vol. 355, No. 4. P. 112–119. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-16

12. Horbiichuk Mykhailo, Vasylenchuk Mykhailo, Yednak Ihor, Lahoida Andrii. Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 1, No. 2(133). P. 85–95. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322424

13. Horbiichuk M. I., Lazoriv N. T., Kohutiak M. I., Manuliak I. Z. Experimental research on muffle furnace dynamic properties. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2023. No. 3. P. 144–150. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/144

14. Горбійчук М., Заячук Я., Когутяк М. Практичні аспекти реалізації коректорів автоматичних систем керування. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. № 1. С. 101–110. DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13

References

1. Rahmati, A. R., & Reiszadeh, M. (2018). An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. *Applied Thermal Engineering, 134*, 107–117. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111

2. Delouei, A. A., Naeimi, H., Sajjadi, H., Atashafrooz, M., Imanparast, M., & Chamkha, A. J. (2024). An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling. *Applied Thermal Engineering, 237*, 121795. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121795

3. Rashidmardani, A., & Hamzehei, M. (2013). Effect of various parameters on indirect fired water bath heaters' efficiency to reduce energy losses. *International Journal of Science and Engineering Investigations, 2*(12), 17–24. https://www.ijsei.com/papers/ijsei-21213-04.pdf

4. Khanmohammadi, S., & Shahsavar, A. (2020). Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). *Energy Equipment and Systems, 8*(4), 349–365. https://doi.org/10.22059/ees.2020.241292

5. Mostafavi, S. A., & Shirazi, M. (2020). Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. *Energy, 212*, 118390. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118390

6. Ebrahimi-Moghadam, A., Deymi-Dashtebayaz, M., Jafari, H., & Niazmand, A. (2020). Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 141*(6), 2573–2588. https://doi.org/10.1007/s10973-020-09413-4

7. Vasylenchuk M., Horbiichuk M., & Kohutyak M. (2023). Synthesis of linearized mathematical models of the heater with intermediate heat carrier. *Measuring and computing devices in technological processes*, (3), 144–153. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17

8. Horbiichuk M., Vasylenchuk M., & Kohutiak M. (2024). System of automatic control of the oil heating process in the way heater. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 314–331. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-39

9. Horbiichuk, M. I., Vasylenchuk, M. Z., & Kohutiak, M. I. (2024). Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2024*(6), 151–157. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/151

10. Horbiichuk, M. I., & Vasylenchuk, M. Z. (2023). Synthesis of the structural diagram of the oil heater as an object of automatic control. *Visnyk of Kherson National Technical University, 2023*(4(87)), 44–52. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5

11. Horbiichuk, M. I., & Vasylenchuk, M. Z. (2025). Structural-parametric synthesis of the automatic control system for a oil road heater. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, *355*(4), 112–119. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-16

12. Horbiichuk Mykhailo, Vasylenchuk Mykhailo, Yednak Ihor, & Lahoida Andrii. (2025). Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1 (2) (133). 85–95. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322424

13. Horbiichuk, M. I., Lazoriv, N. T., Kohutiak, M. I., & Manuliak, I. Z. (2023). Experimental research on muffle furnace dynamic properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023*(3), 144–150. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/144

14. Horbiichuk, M., Zaiachuk, Y., & Kohutiak M. (2024). Practical aspects of implementating the automatic control systems correctors. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 101–110. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025