

АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.121.84

Р.М. Федоришин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПІДІГРІВУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА АВТОМАТИЗОВАНИХ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СТАНЦІЯХ

© Федоришин Р.М., 2007

Виведено математичну модель системи підігріву природного газу на автоматизованих газорозподільних станціях. Наведено дослідження отриманої моделі та її порівняння з експериментальними даними.

Mathematical model of natural gas heating system applied in automated gas distributing stations is presented in the paper. The derivation sequence of the mathematical model and its comparison with experimental data are given in the paper.

Постановка проблеми. Одним із стратегічно важливих енергоносіїв для України є природний газ. І точний облік природного газу є одним з першочергових завдань як для постачальників, так і для споживачів цього енергоносія. Для подачі газу від газових родовищ до споживачів над газом виконується ряд робіт: очищення, осушення, стиснення, підігрівання, редукування тощо. Характер перебігу всіх цих процесів впливає на точність вимірювання витрати газу, оскільки дуже часто облік газу ведеться одночасно з одним або декількома з цих процесів.

У роботі звертається увага на процес підігріву природного газу на автоматизованих газорозподільних станціях (АГРС). Підігрів природного газу на АГРС необхідно здійснювати для нормального функціонування основного агрегата АГРС – редуктора тиску газу. Оскільки за різкого падіння тиску на редукторі (дроселюванні) відбувається різке падіння температури газу, то це може призвести до утворення гідратів, обмерзання трубопроводу, замерзання та блокування регулювальної арматури редуктора. Для уникнення цього небажаного явища природний газ попередньо підігрівають. Спосіб та режим підігріву газу впливають на формування фізичних параметрів (температура, тиск) та структуру потоку газу на вимірювальній ділянці трубопроводу під час встановлення вузла обліку після підігрівача. Оскільки облік природного газу на вітчизняних АГРС ведеться здебільшого витратомірами змінного перепаду тиску, то тут стан потоку природного газу є одним з визначальних чинників точності вимірювання витрати газу [1]. Для моделювання теплових режимів роботи витратомірних вузлів на АГРС з підігрівом газу необхідно мати математичну модель системи підігріву газу.

Аналіз останніх досліджень. У зв'язку із підвищеною увагою газотранспортних та газорозподільних організацій до використання та точного обліку природного газу автором проведено аудит великої кількості діючих вузлів обліку природного газу із системами підігріву газу. Результати аудиту показують, що в багатьох системах обліку на основі методу змінного перепаду тиску істотним впливом на точність обліку газу є температурний режим потоку газу, який залежить від способу та режиму підігріву газу [1]. Однак вплив динаміки зміни параметрів потоку газу внаслідок його нагрівання на точність вимірювання витрати газу залишається не дослідженим.

Мета роботи – отримати адекватну математичну модель процесу підігріву природного газу на АГРС, дослідити цю модель та її вплив на формування теплового режиму потоку газу на вимірювальній ділянці газопроводу.

Виклад основного матеріалу. Підігрів газу може здійснюватися за допомогою:

- водогрійних котлів і теплообмінників різних типів, які використовують гарячу воду як теплоносії;
- насиченої пари, що подається в теплообмінник від промислових парокотельних установок;
- електричних нагрівачів води в системі підігріву газу;
- вогневих підігрівачів з проміжним теплоносієм.

Одним з найбільш поширених на АГРС є вогневий підігрівач з проміжним теплоносієм типу ПТПГ-30, який призначений для непрямого нагрівання природного газу перед його дроселюванням [2].

Загальний вигляд підігрівача ПТПГ-30 показано на рис. 1. Конструктивно підігрівач складається з корпусу підігрівача 7, в який вбудовано трубний пучок 2, теплогенератор 5, роздільну камеру 1.

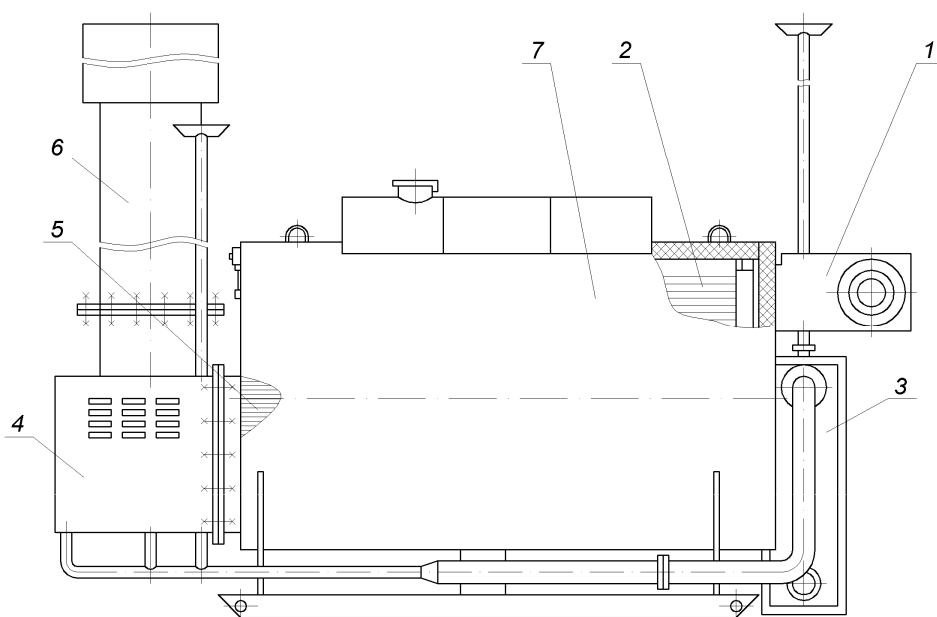


Рис. 1. Загальний вигляд підігрівача ПТПГ-30

Принцип роботи підігрівача ПТПГ-30 полягає ось у чому: природний газ з магістралі під тиском не більше 7,35 МПа поступає в один з двох відсіків роздільної камери 1, а потім – у двоходовий трубний пучок 2, де нагрівається сумішшю діетиленгліколь-вода. Нагрітий газ повертається в другий відсік роздільної камери 1 і поступає в магістраль. Паливний газ із магістралі після редуктора під тиском 0,6 МПа поступає в газорегуляторний шафний пункт ПШГР-2 3, де його тиск знижується і підтримується на заданому рівні (0,03–0,069 МПа), після чого він подається на блок пальника 4, де відбувається його спалювання. Продукти згоряння паливного газу через теплогенератор 5 поступають в димохід 6, звідки видаляються в атмосферу.

Для виведення рівнянь динаміки підігрівача, схематичне зображення якого показано на рис. 2, приймемо такі припущення:

- підігрівач є об'єктом з зосередженими параметрами, тобто температура димових газів є однаковою в усіх точках об'єму теплогенератора, температура газу є однаковою в усіх точках об'єму пучка труб, температура стінок теплопередачі є однаковою в усіх точках;
- тепловий опір стінок теплопередачі є дуже малий;
- коефіцієнти тепловіддачі від димових газів до стінки теплогенератора, від стінки теплогенератора до проміжного теплоносія, від проміжного теплоносія до стінок пучка труб, від стінок пучка труб до газу є величинами, сталими в часі;

- питомі теплоємності та коефіцієнти теплопровідності димових газів, проміжного теплоносія, природного газу та стінок теплопередачі є величинами, сталими в часі;
- теплота, яку віддають димові газу в теплогенераторі, іде на зміну температури стінок теплопередачі та проміжного теплоносія і на нагрівання природного газу (втрати тепла через корпус в атмосферу відсутні);
- температура димових газів на вході теплогенератора є величиною сталою, оскільки вважаємо, що теплотвірна здатність паливного газу не змінюється і вся теплота під час згоряння паливного газу поступає на вхід теплогенератора з димовими газами;
- температура природного газу на вході підігрівача є величиною сталою, оскільки газ транспортується до АГРС через довгий підземний магістральний газопровід, в якому усі коливання температури усереднюються (згладжуються).

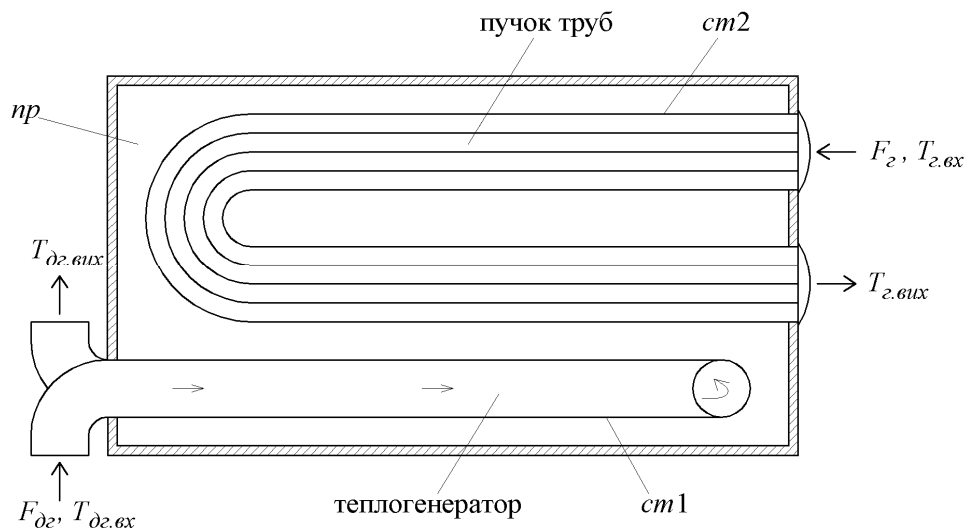


Рис. 2. Схема підігрівача природного газу:

F_g – витрата природного газу через трубний пучок підігрівача;

$T_{г.вх}$ – температура природного газу на вході підігрівача; $T_{г.вх}$ – температура природного газу на виході підігрівача; $F_{дг}$ – витрата димових газів через теплогенератор підігрівача;

$T_{дг.вх}$ – температура димових газів на вході теплогенератора; $T_{дг.вх}$ – температура димових газів на виході теплогенератора; $ст1$ – стінка теплогенератора; $ст2$ – стінка трубного пучка; $пр$ – проміжний теплоносіє (суміш діетиленгліколь-вода)

Для побудови математичної моделі підігрівача природного газу на основі теплового балансу необхідно визначити стадії передачі теплоти у ньому. Теплота в підігрівачі природного газу передається за такими стадіями:

- зміна теплового потоку в димових газах, під час їх протікання через теплогенератор, іде на нагрівання стінки теплогенератора;
- теплота, що передається стінці теплогенератора від димових газів, поступає до проміжного теплоносія;
- теплота, що поступає до проміжного теплоносія від стінки теплогенератора, передається стінкам пучка труб;
- теплота, що передається стінкам пучка труб від проміжного теплоносія, поступає до потоку природного газу, що протікає через пучок труб;
- теплота, що поступає від стінок пучка труб, іде на зміну теплового потоку в природному газі, що протікає через пучок труб.

Динамічні процеси теплообміну в підігрівачі природного газу, на основі описаних вище стадій передачі теплоти, можна описати такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dQ_{\partial z}}{d\phi} = \Delta q_{\partial z} - q_{cm1.ex}; \\ \frac{dQ_{cm1}}{d\phi} = q_{cm1.ex} - q_{cm1.oux}; \\ \frac{dQ_{np}}{d\phi} = q_{np.ex} - q_{np.oux}; \\ \frac{dQ_{cm2}}{d\phi} = q_{cm2.ex} - q_{cm2.oux}; \\ \frac{dQ_z}{d\phi} = q_{cm2.oux} - \Delta q_z, \end{cases} \quad (1)$$

де $dQ_{\partial z}/d\tau$ – зміна кількості теплоти в димових газах теплогенератора з часом; $\Delta q_{\partial z}$ – зміна теплового потоку в димових газах під час їх протікання через теплогенератор; $q_{cm1.ex}$ – тепловий потік, який поступає до стінки теплогенератора від димових газів; $dQ_{cm1}/d\tau$ – зміна кількості теплоти у стінці теплогенератора з часом; $q_{cm1.oux}$ – тепловий потік, який поступає від стінки теплогенератора до проміжного теплоносія; $dQ_{np}/d\tau$ – зміна кількості теплоти у проміжному теплоносії з часом; $q_{np.ex} = q_{cm1.oux}$ – тепловий потік, який поступає до проміжного теплоносія від стінки теплогенератора; $q_{np.oux}$ – тепловий потік, який поступає від проміжного теплоносія до стінок пучка труб; $dQ_{cm2}/d\tau$ – зміна кількості теплоти у стінках пучка труб з часом; $q_{cm2.ex} = q_{np.oux}$ – тепловий потік, який поступає від проміжного теплоносія до стінок пучка труб; $q_{cm2.oux}$ – тепловий потік, який поступає від стінок пучка труб до потоку газу; $dQ_z/d\tau$ – зміна кількості теплоти в газі, який знаходиться в пучку труб, з часом; Δq_z – зміна теплового потоку в газі, під час його протікання через пучок труб.

Перше рівняння в системі (1) побудоване на основі теплового балансу для димових газів у теплогенераторі, друге – на основі теплового балансу для стінки теплогенератора, третє – на основі теплового балансу для проміжного теплоносія, четверте – на основі теплового балансу для стінок пучка труб, а п’яте рівняння – на основі теплового балансу для газу в пучку труб підігрівача.

Зміни кількості теплоти $dQ_{\partial z}/d\tau$, $dQ_{cm1}/d\tau$, $dQ_{np}/d\tau$, $dQ_{cm2}/d\tau$, $dQ_z/d\tau$ визначаються через відповідні маси, теплоємності та зміни температури [3], наприклад для димових газів:

$$\frac{dQ_{\partial z}}{d\phi} = m_{\partial z} \cdot c_{p \partial z} \cdot \frac{dT_{\partial z.oux}}{d\phi}. \quad (2)$$

Зміна теплових потоків, які надходять чи виходять разом з матеріальними потоками, $\Delta q_{\partial z}$, Δq_z , визначається через відповідні масові витрати, теплоємності та зміни температури [3], наприклад для димових газів, що протікають через теплогенератор:

$$\Delta q_{\partial z} = F_{\partial z} \cdot c_{p \partial z} \cdot (T_{\partial z.ex} - T_{\partial z.oux}). \quad (3)$$

Масову витрату димових газів $F_{\partial z}$ можна визначити за масовою витратою паливного газу F_{nz} , що поступає в камеру згоряння. Для ідеалізованого випадку, коли вважати, що повітря складається з кисню і азоту і їхні молярні концентрації становлять відповідно 20 і 80 %, з рівняння хімічної реакції спалювання природного газу, з врахуванням молярних мас, впливає таке співвідношення:

$$F_{\partial z} = 19 \cdot F_{nz}. \quad (4)$$

Теплові потоки, які передаються через стінки теплообміну ($cm1$, $cm2$) в підігрівачі шляхом тепловіддачі $q_{cm1.ex}$, $q_{cm1.oux}$, $q_{cm2.ex}$, $q_{cm2.oux}$, визначаються через відповідні коефіцієнти тепловіддачі, площі теплообміну та різниці температур [3], наприклад для внутрішньої поверхні стінки теплогенератора:

$$q_{cm1.ex} = \alpha_{cm1.e} \cdot S_{cm1.e} \cdot (T_{\partial z.oux} - T_{cm1}). \quad (5)$$

Зробивши підстановки вказаних рівнянь (2), (3), (4) та (5) для відповідних величин у систему рівнянь (1), ця система набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} m_{\partial z} \cdot c_{p \partial z} \cdot \frac{dT_{\partial z, \text{вих}}}{d\phi} = 19 \cdot F_{n_2} \cdot c_{p \partial z} \cdot (T_{\partial z, \text{вх}} - T_{\partial z, \text{вих}}) - \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot (T_{\partial z, \text{вих}} - T_{cm1}); \\ m_{cm1} \cdot c_{p cm1} \cdot \frac{dT_{cm1}}{d\phi} = \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot (T_{\partial z, \text{вих}} - T_{cm1}) - \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot (T_{cm1} - T_{np}); \\ m_{np} \cdot c_{p np} \cdot \frac{dT_{np}}{d\phi} = \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot (T_{cm1} - T_{np}) - \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot (T_{np} - T_{cm2}); \\ m_{cm2} \cdot c_{p cm2} \cdot \frac{dT_{cm2}}{d\phi} = \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot (T_{np} - T_{cm2}) - \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot (T_{cm2} - T_{z, \text{вих}}); \\ m_z \cdot c_{p z} \cdot \frac{dT_{z, \text{вих}}}{d\phi} = \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot (T_{cm2} - T_{z, \text{вих}}) - F_z \cdot c_{p z} \cdot (T_{z, \text{вих}} - T_{z, \text{вх}}). \end{cases} \quad (6)$$

Система рівнянь (6) є нелінійною, оскільки в першому і п'ятому рівняннях наявні члени, які є добутками змінних величин ($F_{n_2} \cdot T_{\partial z, \text{вих}}$, $F_z \cdot T_{z, \text{вих}}$). Для лінеаризації системи (6) необхідно визначити які величини, що фігурують в цій системі, є постійними в процесах теплопередачі під час нагрівання газу в підігрівачі, а які – змінними. Визначення постійних та змінних величин наведено в таблиці. Змінні величини записані у вигляді суми базового значення цієї величини і її приросту.

Визначення постійних та змінних величин

Постійні величини	Змінні величини
$m_{\partial z}, m_{cm1}, m_{np}, m_{cm2}, m_z,$	$T_{\partial z, \text{вих}} = T_{\partial z, \text{вих}0} + \Delta T_{\partial z, \text{вих}},$
$c_{p \partial z}, c_{p cm1}, c_{p np}, c_{p cm2}, c_{p z},$	$T_{cm1} = T_{cm1.0} + \Delta T_{cm1},$
$\alpha_{cm1.6}, \alpha_{cm1.3}, \alpha_{cm2.3}, \alpha_{cm2.6},$	$T_{np} = T_{np0} + \Delta T_{np},$
$S_{cm1.6}, S_{cm1.3}, S_{cm2.3}, S_{cm2.6},$	$T_{cm2} = T_{cm2.0} + \Delta T_{cm2},$
$T_{\partial z, \text{вх}} = T_{\partial z, \text{вх}0},$	$T_{z, \text{вих}} = T_{z, \text{вих}0} + \Delta T_{z, \text{вих}},$
$T_{z, \text{вх}} = T_{z, \text{вх}0}.$	$F_{n_2} = F_{n_20} + \Delta F_{n_2},$
	$F_z = F_{z0} + \Delta F_z.$

Визначимо вихідні, вхідні величини та збурення в процесі підігрівання газу. Вихідною величиною є температура газу на виході підігрівача $T_{z, \text{вих}}$, а вхідною величиною є витрата паливного газу F_{n_2} . Збурення у цій системі наноситься витратою газу через трубний пучок підігрівача F_z . Усі інші величини, вказані в таблиці, є або проміжними або незмінними в процесі моделювання підігріву газу. Відповідно до цього структурно-логічна схема підігрівача газу матиме вигляд, показаний на рис. 3.

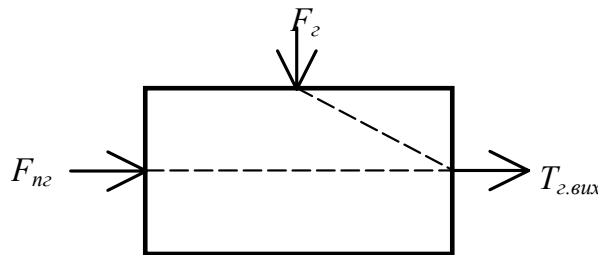


Рис. 3. Структурно-логічна схема підігрівача газу

Система рівнянь теплопередачі в підігрівачі газу для рівноважного стану:

$$\begin{cases} \Delta q_{\partial z0} = q_{cm1.6x0}; \\ q_{cm1.6x0} = q_{cm1.6vx0}; \\ q_{np.6x0} = q_{np.6vx0}; \\ q_{cm2.6x0} = q_{cm2.6vx0}; \\ q_{cm2.6vx0} = \Delta q_{z0}. \end{cases} \quad (7)$$

Підставивши у систему рівнянь (7) наведені вище відповідні рівняння для визначення теплових потоків, вона набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} 19 \cdot F_{n20} \cdot c_{p \partial z} \cdot (T_{\partial z, \partial x0} - T_{\partial z, \partial x0}) = \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot (T_{\partial z, \partial x0} - T_{cm1.0}); \\ \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot (T_{\partial z, \partial x0} - T_{cm1.0}) = \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot (T_{cm1.0} - T_{np0}); \\ \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot (T_{cm1.0} - T_{np0}) = \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot (T_{np0} - T_{cm2.0}); \\ \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot (T_{np0} - T_{cm2.0}) = \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot (T_{cm2.0} - T_{z, \partial x0}); \\ \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot (T_{cm2.0} - T_{z, \partial x0}) = F_{z0} \cdot c_{p z} \cdot (T_{z, \partial x0} - T_{z, \partial x0}). \end{cases} \quad (8)$$

Підставивши у систему (6) величини, згідно з таблицею, і скоротивши усі постійні члени відповідно до рівнянь статики (8), а також усі нелінійні члени, в яких присутні добутки змінних величин, отримаємо лінеаризовану систему диференціальних рівнянь у відхиленнях, що описує теплообмінні процеси у підігрівачі газу:

$$\begin{cases} m_{\partial z} \cdot c_{p \partial z} \cdot \frac{d(\Delta T_{\partial z, \partial x})}{d\phi} + (\alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} + 19 \cdot F_{n20} \cdot c_{p \partial z}) \cdot \Delta T_{\partial z, \partial x} = \\ = \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot \Delta T_{cm1} + 19 \cdot c_{p \partial z} \cdot (T_{\partial z, \partial x0} - T_{\partial z, \partial x0}) \cdot \Delta F_{n2}; \\ m_{cm1} \cdot c_{p cm1} \cdot \frac{d(\Delta T_{cm1})}{d\phi} + (\alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} + \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3}) \cdot \Delta T_{cm1} = \\ = \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot \Delta T_{\partial z, \partial x} + \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot \Delta T_{np}; \\ m_{np} \cdot c_{p np} \cdot \frac{d(\Delta T_{np})}{d\phi} + (\alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} + \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3}) \cdot \Delta T_{np} = \\ = \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot \Delta T_{cm1} + \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot \Delta T_{cm2}; \\ m_{cm2} \cdot c_{p cm2} \cdot \frac{d(\Delta T_{cm2})}{d\phi} + (\alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} + \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6}) \cdot \Delta T_{cm2} = \\ = \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot \Delta T_{np} + \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot \Delta T_{z, \partial x}; \\ m_z \cdot c_{p z} \cdot \frac{d(\Delta T_{z, \partial x})}{d\phi} + (\alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} + F_{z0} \cdot c_{p z}) \cdot \Delta T_{z, \partial x} = \\ = \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot \Delta T_{cm2} + c_{p z} \cdot (T_{z, \partial x0} - T_{z, \partial x0}) \cdot \Delta F_z. \end{cases} \quad (9)$$

Для подання системи (9) у безрозмірному вигляді та для спрощення подальших математичних перетворень введемо такі позначення:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{\Delta T_{\partial z, \partial x}}{T_{\partial z, \partial x0}}; \quad u_2 = \frac{\Delta T_{cm1}}{T_{cm1.0}}; \quad u_3 = \frac{\Delta T_{np}}{T_{np0}}; \quad u_4 = \frac{\Delta T_{cm2}}{T_{cm2.0}}; \quad x = \frac{\Delta F_{n2}}{F_{n20}}; \quad y = \frac{\Delta T_{z, \partial x}}{T_{z, \partial x0}}; \quad z = \frac{\Delta F_z}{F_{z0}}; \\ a_{11} &= m_{\partial z} \cdot c_{p \partial z} \cdot T_{\partial z, \partial x0}; \quad a_{12} = (\alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} + 19 \cdot F_{n20} \cdot c_{p \partial z}) \cdot T_{\partial z, \partial x0}; \\ b_{11} &= \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot T_{cm1.0}; \quad b_{12} = 19 \cdot c_{p \partial z} \cdot (T_{\partial z, \partial x0} - T_{\partial z, \partial x0}) \cdot F_{n20}; \\ a_{21} &= m_{cm1} \cdot c_{p cm1} \cdot T_{cm1.0}; \quad a_{22} = (\alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} + \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3}) \cdot T_{cm1.0}; \\ b_{21} &= \alpha_{cm1.6} \cdot S_{cm1.6} \cdot T_{\partial z, \partial x0}; \quad b_{22} = \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot T_{np0}; \\ a_{31} &= m_{np} \cdot c_{p np} \cdot T_{np0}; \quad a_{32} = (\alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} + \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3}) \cdot T_{np0}; \\ b_{31} &= \alpha_{cm1.3} \cdot S_{cm1.3} \cdot T_{cm1.0}; \quad b_{32} = \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot T_{cm2.0}; \\ a_{41} &= m_{cm2} \cdot c_{p cm2} \cdot T_{cm2.0}; \quad a_{42} = (\alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} + \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6}) \cdot T_{cm2.0}; \\ b_{41} &= \alpha_{cm2.3} \cdot S_{cm2.3} \cdot T_{np0}; \quad b_{42} = \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot T_{z, \partial x0}; \\ a_{51} &= m_z \cdot c_{p z} \cdot T_{z, \partial x0}; \quad a_{52} = (\alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} + F_{z0} \cdot c_{p z}) \cdot T_{z, \partial x0}; \\ b_{51} &= \alpha_{cm2.6} \cdot S_{cm2.6} \cdot T_{cm2.0}; \quad b_{52} = c_{p z} \cdot (T_{z, \partial x0} - T_{z, \partial x0}) \cdot F_{z0}. \end{aligned}$$

Із врахуванням прийнятих позначень система (9) набере такого вигляду:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot \frac{du_1}{d\phi} + a_{12} \cdot u_1 = b_{11} \cdot u_2 + b_{12} \cdot x; \\ a_{21} \cdot \frac{du_2}{d\phi} + a_{22} \cdot u_2 = b_{21} \cdot u_1 + b_{22} \cdot u_3; \\ a_{31} \cdot \frac{du_3}{d\phi} + a_{32} \cdot u_3 = b_{31} \cdot u_2 + b_{32} \cdot u_4; \\ a_{41} \cdot \frac{du_4}{d\phi} + a_{42} \cdot u_4 = b_{41} \cdot u_3 + b_{42} \cdot y; \\ a_{51} \cdot \frac{dy}{d\phi} + a_{52} \cdot y = b_{51} \cdot u_4 + b_{52} \cdot z. \end{cases} \quad (10)$$

У системі (10) вхідна (x) та вихідна величини (y) підігрівача пов'язані між собою за допомогою проміжних величин (u_1, u_2, u_3 та u_4). Диференціальне рівняння, що описує теплообмінні процеси в підігрівачі без проміжних величин, отримане на основі системи рівнянь (10), має такий вигляд:

$$\begin{aligned} T_{11} \cdot \frac{d^5 y}{d\phi^5} + T_{12} \cdot \frac{d^4 y}{d\phi^4} + T_{13} \cdot \frac{d^3 y}{d\phi^3} + T_{14} \cdot \frac{d^2 y}{d\phi^2} + T_{15} \cdot \frac{dy}{d\phi} + y = \\ = k_1 \cdot x + k_2 \cdot \left(T_{21} \cdot \frac{d^4 z}{d\phi^4} + T_{22} \cdot \frac{d^3 z}{d\phi^3} + T_{23} \cdot \frac{d^2 z}{d\phi^2} + T_{24} \cdot \frac{dz}{d\phi} + z \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Після відповідних підстановок та перепозначень статична характеристика підігрівача, отримана на основі системи рівнянь статички (8), має такий вигляд:

$$Y = \frac{B_1 \cdot X + B_2 \cdot X \cdot Z + B_3 \cdot Z}{B_4 \cdot X + B_5 \cdot X \cdot Z + B_6 \cdot Z + B_7}, \quad (12)$$

де $Y = T_{z, \text{вих}} / T_{z, \text{вх}0}$, $X = F_{nz} / F_{nz0}$, $Z = F_z / F_{z0}$ – відповідно вихідна та вхідна величини та збурення підігрівача в безрозмірній формі; $B_1 \dots B_7$ – сталі коефіцієнти, які розраховуються на основі постійних величин (таблиця).

Розрахунок сталих часу, коефіцієнтів передачі та сталих коефіцієнтів у рівняннях (11) та (12) здійснюється на основі конструктивних характеристик підігрівача та теплофізичних властивостей усіх матеріальних потоків, які беруть участь у теплообмінних процесах під час нагрівання газу в підігрівачі. Конструктивні характеристики підігрівача газу (маса та розміри складових частин) можна отримати на основі [2, 4]. Теплофізичні властивості природного газу (густина, в'язкість, теплоємність та теплопровідність в робочих умовах) розраховуються на основі [5–8]. Теплофізичні властивості димових газів та проміжного теплоносія (водного розчину диетиленгліколю) розраховуються на основі [3, 9, 10]. Наступні базові величини були отримані в результаті експериментальних досліджень підігрівачів типу ПТПГ-30 на АГРС: температура газу на вході та виході підігрівача ($T_{z, \text{вх}0}$, $T_{z, \text{вих}0}$ відповідно), витрата газу через підігрівач (F_{z0}), а також витрата паливного газу на пальник підігрівача (F_{nz0}). Розрахунок інших базових величин здійснюється на основі рівнянь статички (8). Результати розрахунку сталих часу, коефіцієнтів передачі та сталих коефіцієнтів в рівняннях (11) та (12):

$$\begin{aligned} T_{11} &= 2,0703 \cdot 10^{12} \text{ с}^5; & k_2 &= -0,0693 = -B_1 = 0,3754 \cdot 10^3, \\ T_{12} &= 1,3278 \cdot 10^{11} \text{ с}^4; & & & & B_2 = 0,7920 \cdot 10^3, \\ T_{13} &= 1,1665 \cdot 10^9 \text{ с}^3; & & & & B_3 = 3,2531 \cdot 10^3, \\ T_{14} &= 3,6225 \cdot 10^6 \text{ с}^2; & & & & B_4 = 0,0689 \cdot 10^3, \\ T_{15} &= 4,0670 \cdot 10^3 \text{ с}; & & & & B_5 = 0,8520 \cdot 10^3, \\ k_1 &= 0,0335 = 0,8051 \frac{\text{К}}{\text{м}^3/\text{год}}; & T_{21} &= 7,0461 \cdot 10^9 \text{ с}^4; & & B_6 = 3,4996 \cdot 10^3, \\ & & T_{22} &= 4,2791 \cdot 10^8 \text{ с}^3; & & B_7 = 0,1746, \\ & & T_{23} &= 2,5139 \cdot 10^6 \text{ с}^2; & & \\ & & T_{24} &= 3,7732 \cdot 10^3 \text{ с}; & & \end{aligned}$$

У графічному вигляді статична характеристика підігрівача для вхідного каналу показана на рис. 4, а для каналу збурення – на рис. 5.

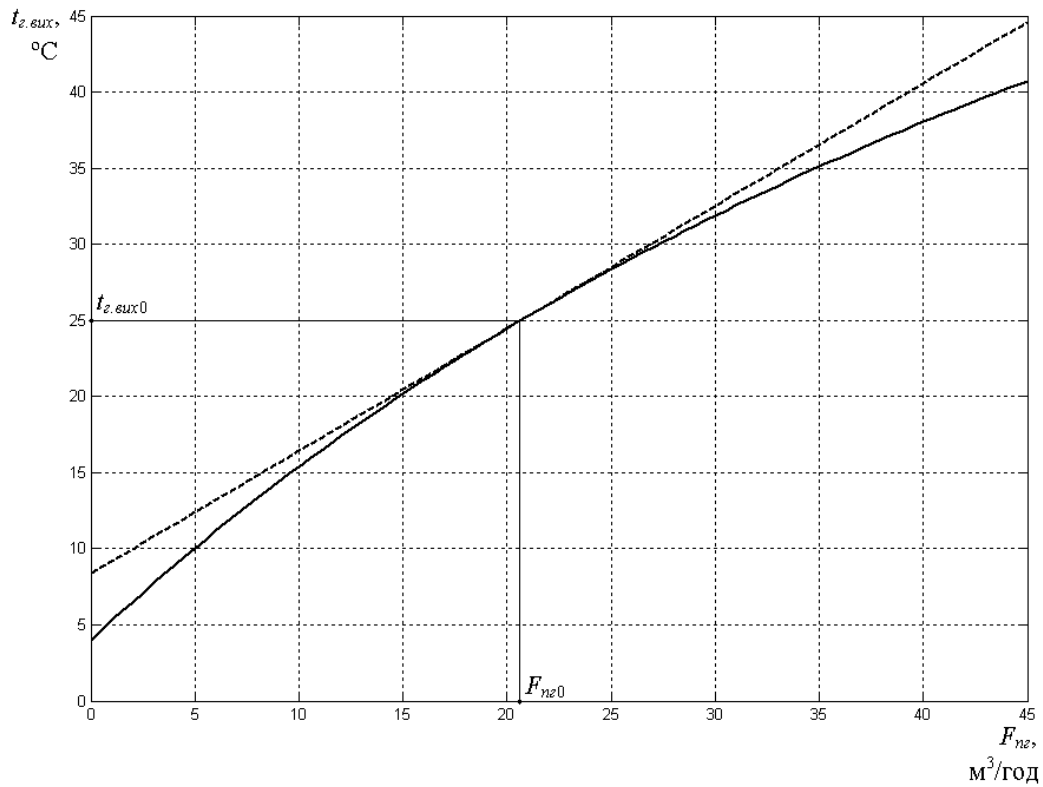


Рис. 4. Статична характеристика підігрівача для вхідного каналу $y(x)$:
 — статична характеристика нелінійної моделі підігрівача відповідно до рівняння (12);
 - - - статична характеристика лінеаризованої моделі підігрівача ($k_1 = 0,8051 \text{ K}/(\text{m}^3/\text{год})$)

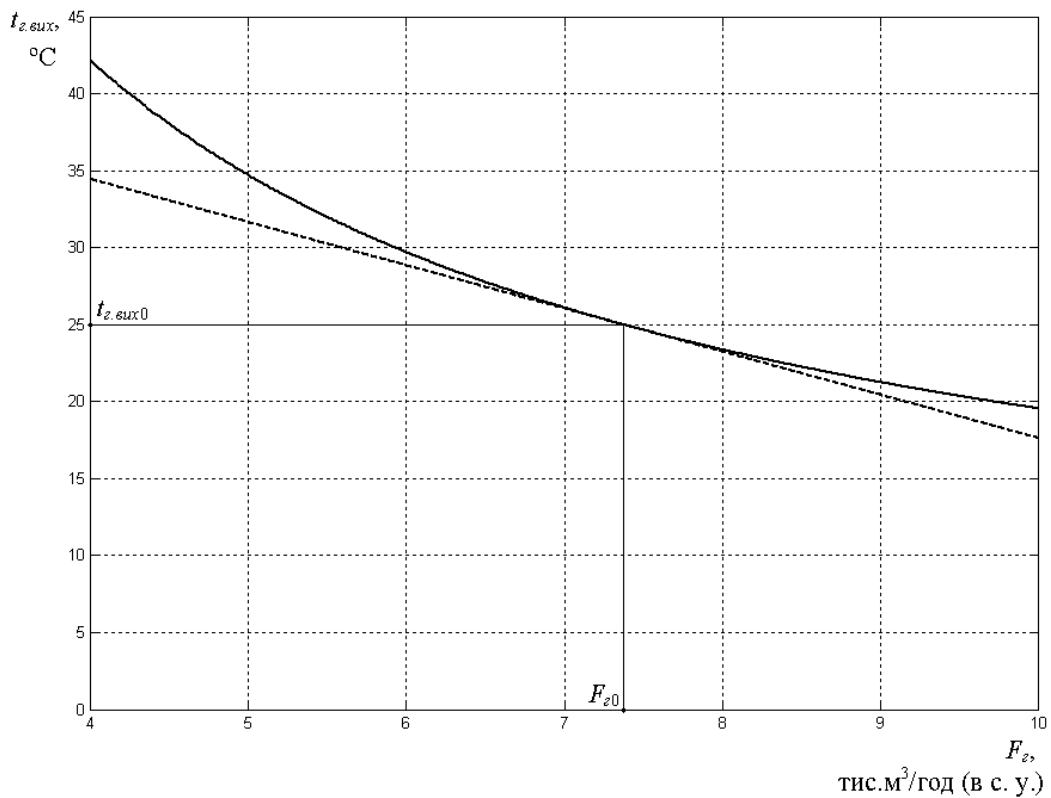


Рис. 5. Статична характеристика підігрівача для каналу збурення $y(z)$:
 — статична характеристика нелінійної моделі підігрівача відповідно до рівняння (12);
 - - - статична характеристика лінеаризованої моделі підігрівача ($k_2 = -0,0028 \text{ K}/(\text{m}^3/\text{год}(\text{в с.у.}))$)

На основі диференціального рівняння (11) запишемо функції передачі підігрівача для вхідного каналу та для каналу збурення:

$$W_x(p) = \frac{k_1}{T_{11} \cdot p^5 + T_{12} \cdot p^4 + T_{13} \cdot p^3 + T_{14} \cdot p^2 + T_{15} \cdot p + 1}; \quad (13)$$

$$W_z(p) = \frac{k_2 \cdot (T_{21} \cdot p^4 + T_{22} \cdot p^3 + T_{23} \cdot p^2 + T_{24} \cdot p + 1)}{T_{11} \cdot p^5 + T_{12} \cdot p^4 + T_{13} \cdot p^3 + T_{14} \cdot p^2 + T_{15} \cdot p + 1}. \quad (14)$$

Перехідна характеристика підігрівача для вхідного каналу ($\Delta x = 1$) зображена на рис. 6, а для каналу збурення ($\Delta z = 1$) – на рис. 7.

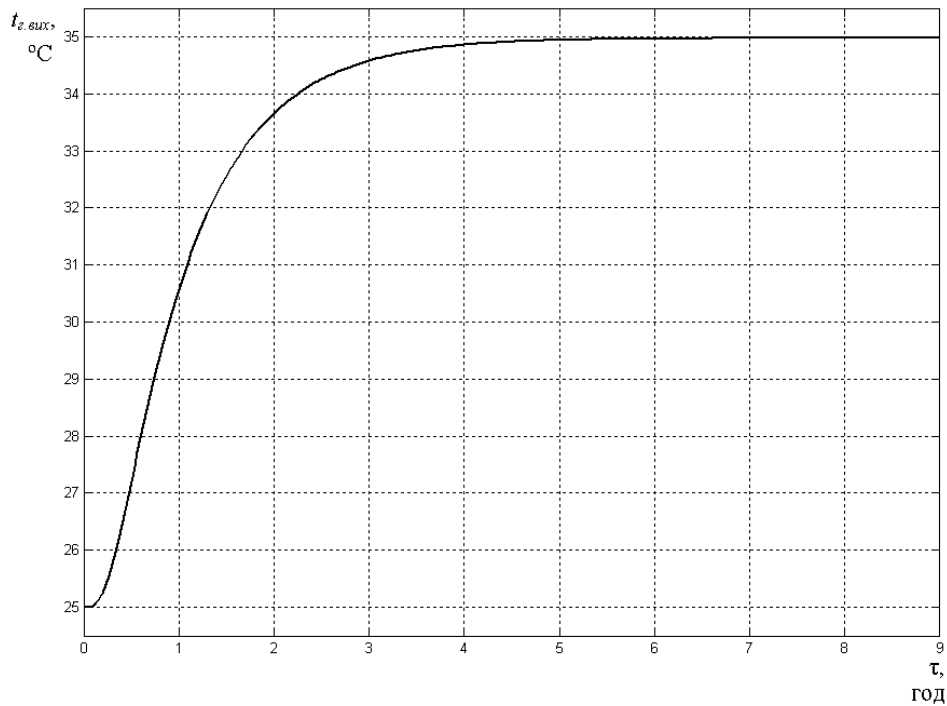


Рис. 6. Перехідна характеристика підігрівача для вхідного каналу

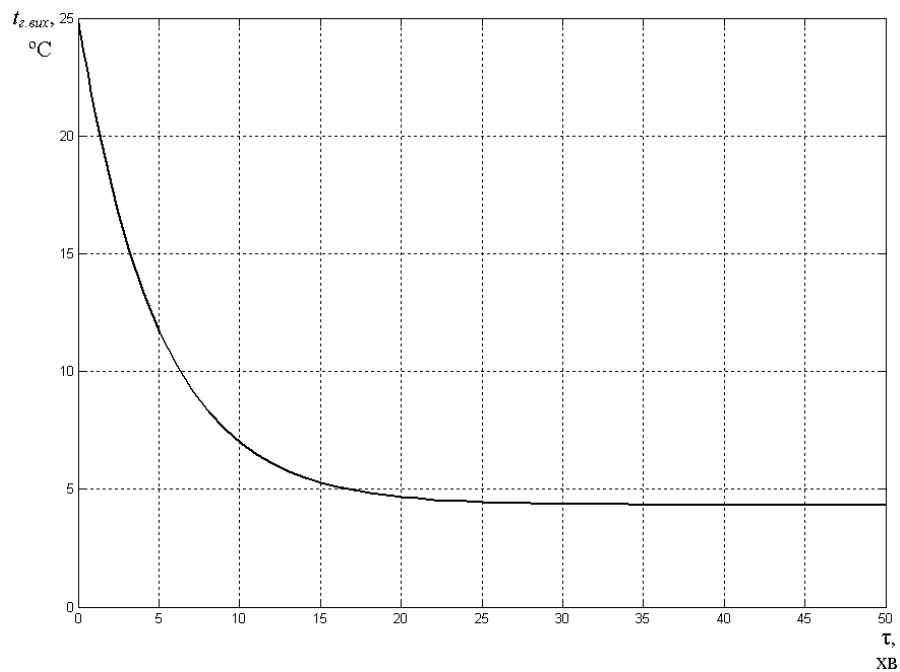


Рис. 7. Перехідна характеристика підігрівача для каналу збурення

Перехідний процес зміни температури газу на виході підігрівача за отриманими експериментальними даними, показано на рис. 8. Експериментальні дані були отримані в системі підігріву, де регулювання температури газу здійснюється за законом двопозиційного регулювання. Система автоматичного регулювання (САР) температури на експериментальному підігрівачі складається з манометричного термометра з вбудованим двопозиційним регулятором, підсилювача та електромагнітного вентиля на лінії подачі паливного газу. Регулятор вмикає подачу паливного газу, коли температура газу на виході підігрівача опускається до 20 °С, і вимикає подачу газу, коли температура газу піднімається до 30 °С.

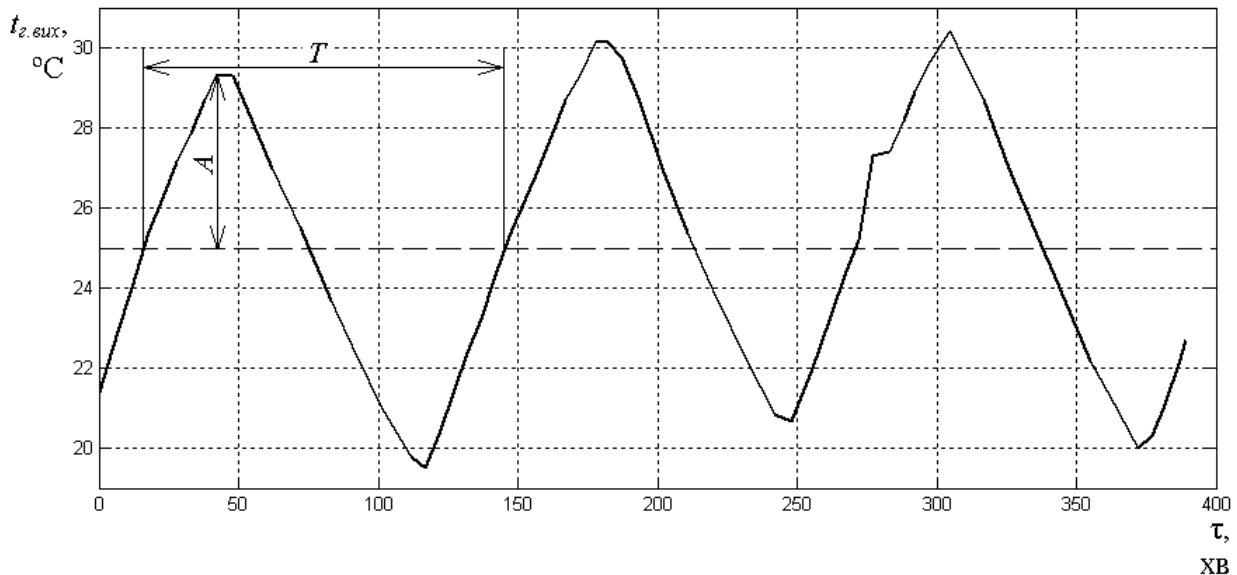


Рис. 8. Експериментальні дані перехідного процесу двопозиційного регулювання температури

Унаслідок недосконалості системи регулювання температури на експериментальному підігрівачі, за рахунок великої похибки манометричного термометра та регулятора, період та амплітуда коливань є нерівномірними. Середнє значення періоду коливань температури газу, відповідно до отриманих експериментальних даних, становить $T_{сер}=128$ хв, а амплітуди коливань – $A_{сер}=4,97$ °С.

Для моделювання перехідного процесу та перевірки на адекватність отриманої математичної моделі підігрівача газу застосуємо структурну схему, показано на рис. 9.

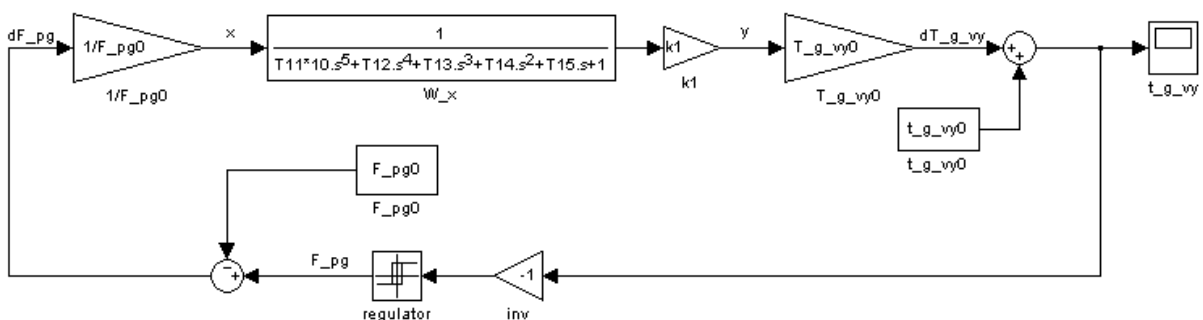


Рис. 9. Структурна схема системи підігріву газу з двопозиційним регулятором температури газу

В результаті проведеного моделювання за схемою, показаною на рис. 9, було отримано перехідний процес (рис. 10).

З рис. 10 зрозуміло, що отримана математична модель підігрівача природного газу (диференціальне рівняння (11) та функція передачі (13)) відповідає реальному характеру перебігу

процесу підігріву природного газу на підігрівачі типу ПТПГ-30 з двопозиційним законом регулювання. Період коливань температури у змодельованій системі становить $T=139$ хв, а амплітуда – $A=5,29$ °С. Отримані значення періоду та амплітуди відрізняються від експериментальних значень відповідних характеристик на 8,8 та 6,8 % відповідно. Така відмінність між результатами моделювання та експериментальними даними свідчить про те, що отримана математична модель є достатньо точною для її застосування на практиці.

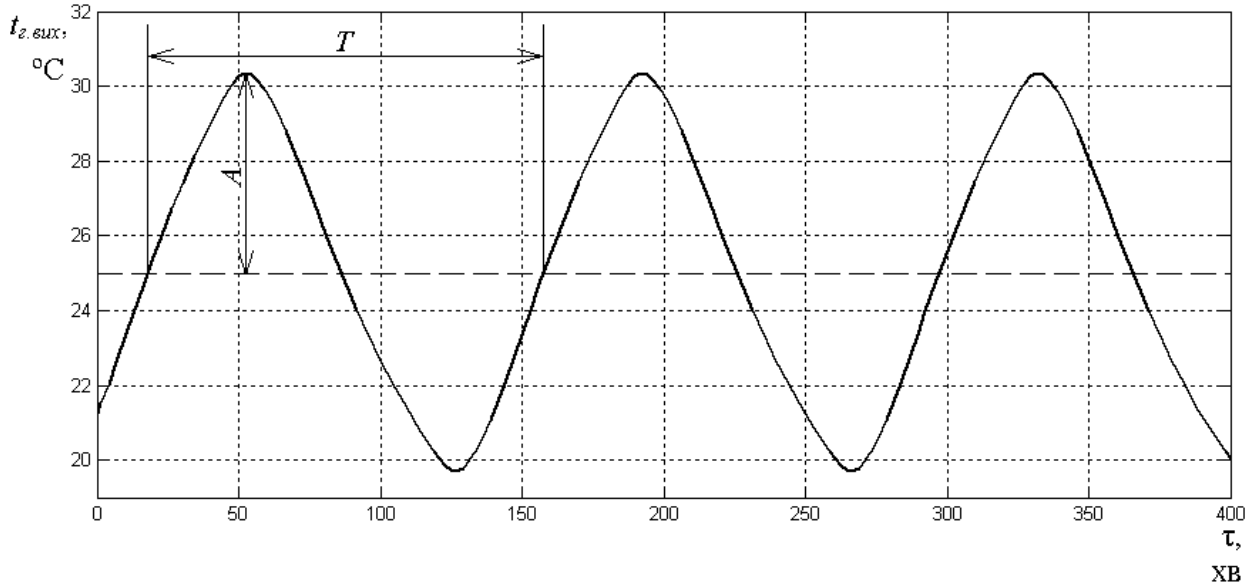


Рис. 10. Перехідний процес в системі, показаний на рис. 9

Для забезпечення кращої якості регулювання та уникнення постійних коливань температури газу на виході підігрівача доцільно застосовувати систему неперервного регулювання. Оскільки підігрівач природного газу є достатньо інерційним об'єктом, то доцільно застосувати для нього регулятор з ПІД-законом регулювання. Оптимальні значення настроювальних параметрів ПІД-регулятора температури газу на виході підігрівача, отримані за методом розширених частотних характеристик [11], для відпрацювання збурення витратою природного газу: $k_p = 23,2235$, $T_i = 3842,17$ с, $T_d = 1536,87$ с.

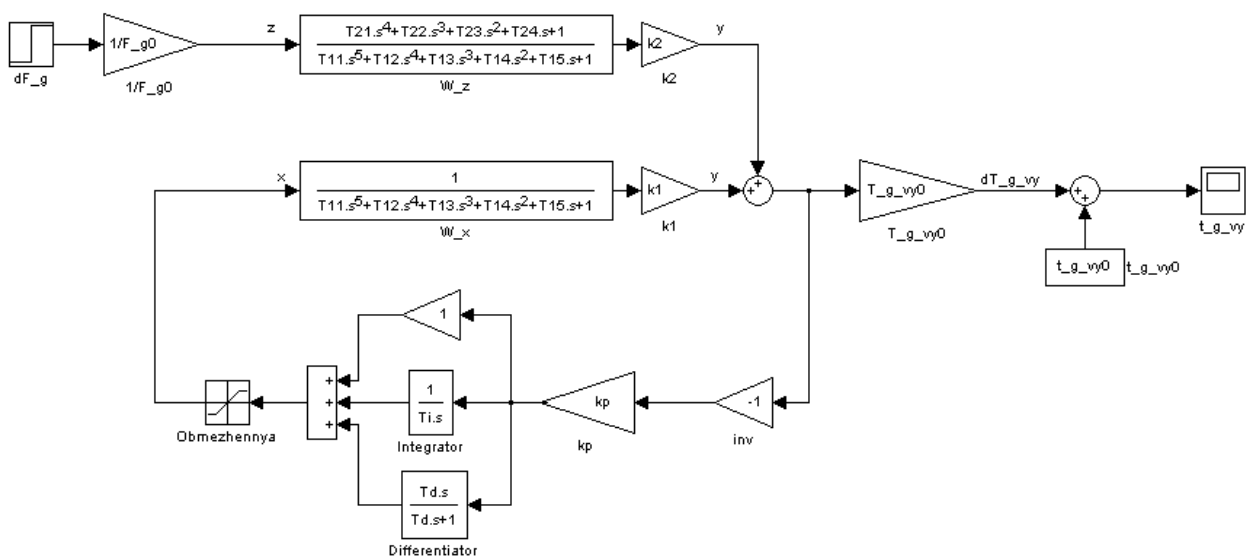


Рис. 11. Структурна схема САР температури газу на виході підігрівача з ПІД-регулятором

Структурна схема моделі САР температури газу з ПД-регулятором для збурення витратою природного газу зображена на рис. 11. Перехідний процес у цій САР, за стрибкоподібного збільшення витрати природного газу через підігрівач на 1000 м³/год (в с.у.), зображений на рис. 12.

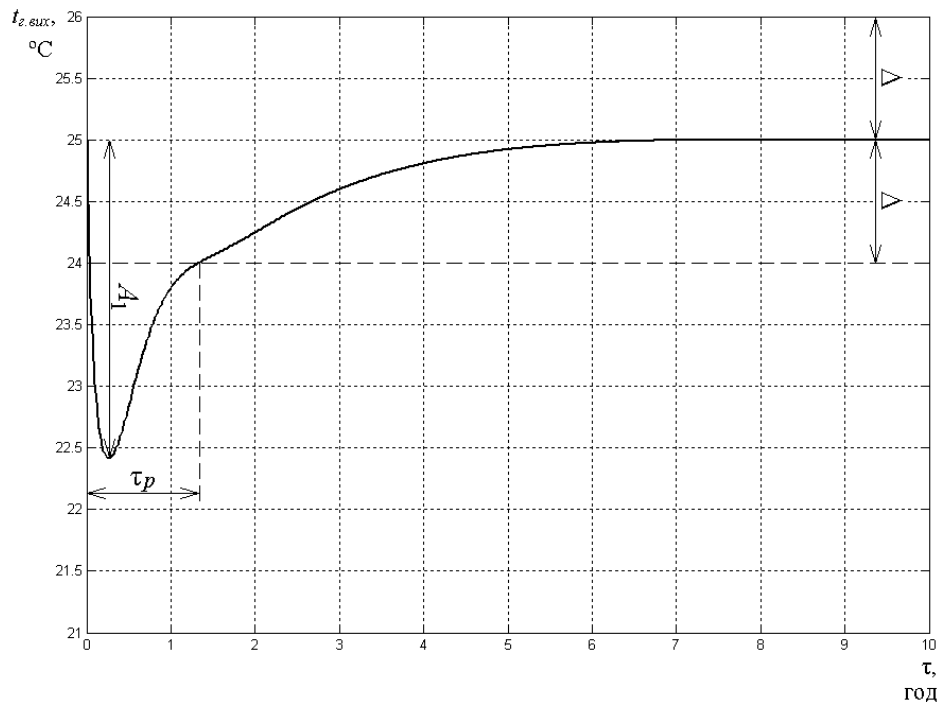


Рис. 12. Перехідний процес в САР температури газу на виході підігрівача за стрибкоподібного збільшення витрати природного газу на 1000 м³/год (в с.у.)

Отриманий перехідний процес має такі характеристики якості регулювання: за точності регулювання $\Delta=1$ °C час регулювання становить $\tau_p=120$ хв; максимальне динамічне відхилення $A_1=2,6$ °C.

Висновки. З результатів порівняння експериментальних значень з розрахунковими зрозуміло, що отримана математична модель на основі теплового балансу адекватно описує теплообмінні процеси в системі підігріву природного газу. Відмінність між розрахованою математичною моделлю та реальним об'єктом становить 8,8 %, що свідчить про достатньо високу точність отриманої моделі для її застосування на практиці.

На основі отриманої математичної моделі підігрівача природного газу проведено розрахунок оптимальних значень настроювальних параметрів ПД-регулятора, які забезпечують високу якість регулювання і можуть бути застосовані на практиці.

За отриманою математичною моделлю системи підігріву можна розраховувати динаміку зміни теплового режиму газового потоку на вимірювальній ділянці газопроводу, встановленій після нагрівача газу, та виявляти і розраховувати динамічні та систематичні похибки вимірювання витрати газу методом змінного перепаду тиску. Подальше усунення виявлених похибок шляхом зміни режимів роботи підігрівача та вживання додаткових заходів дасть змогу зменшити дисбаланси та підвищити точність обліку природного газу.

1. Матіко Ф., Федоришин Р. Аудит вузлів обліку природного газу з метою підвищення їх точності // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2006. – № 561. – С. 38–46. 2. Подогреватель топливного и пускового газа ПТПГ-30. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 4695605.017.213.00 00 00. 1989 г. – № 9/440. 3. Лабай В.Й. Тепломасообмін: Підручник для ВНЗ. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с. 4. Горелка ГИК-2. Паспорт с инструкцией по монтажу и эксплуатации. 5. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. 6. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение

коэффициента сжимаемости. 7. ГОСТ 30319.3-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния. 8. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. – Л.: Химия, 1971. – 704 с. 9. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.: Надра, 1972 – 720 с. 10. Чиркин В.С. Теплофизические свойства веществ. – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с. 11. Методы расчета систем автоматического регулирования: Учеб. пособие по специальности “Автоматизация производственных процессов” / Под ред. В.В. Волгина. – М., 1972. – 192 с.

УДК 681.325.65:519.714

Н.М. Якимчук

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ПІДГОТОВКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ СИНТЕЗУ ОБ’ЄКТІВ КЕРУВАННЯ ЦИФРОВИХ АВТОМАТНИХ СИСТЕМ

© Якимчук Н.М., 2007

Розглянуто методику отримання структурних формул для відображення умов роботи промислових автоматних систем на основі методу часових діаграм, що дає змогу одержати логічну послідовність операцій та здійснити реалізацію об’єктів керування за допомогою мікропроцесорних засобів. Розроблена методика дає можливість побудувати блок-схему алгоритму розв’язання задач.

The method of reception of structural formulas for display of operating conditions of industrial automatic systems on the basis of a time diagrams method is considered, it allows to receive logic sequence of operations and to realize objects of control by means of microprocessor means. The developed method allows constructing the block diagram of algorithm for the decision of problems.

Постановка проблеми. Доцільність розробки і дослідження цифрових автоматних систем полягає у все більшому ускладненні задач керування в промисловості, необхідності розширення логічних функцій сучасних автоматичних пристроїв, збільшенні вимог до їх швидкодії та надійності. Ці задачі вимагають розробки таких методів та методик, які б давали можливість формалізувати і спростити процес синтезу алгоритмів керування технологічними об’єктами з метою подальшої їх реалізації як у вигляді створення спеціальних логічних пристроїв керування, так і для використання під час складання програм обробки інформації засобами сучасної обчислювальної техніки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Універсальні формальні методи системного проектування, придатні для загального випадку, сьогодні не розроблені. Тому здебільшого проектування ґрунтується на евристичному методі і спрямоване на створення спеціальних елементів і вузлів обчислювальних пристроїв. Для окремих класів цифрових пристроїв формальні методи проектування існують, наприклад, формалізована методика синтезу ЕОМ, створена під керівництвом академіка В.М. Глушкова [1, 4], а також метод блокового синтезу, розроблений М.А. Гавриловим [2, 5], який уможливує синтезувати складні цифрові пристрої із простих блоків, що виконують окремі функції. Більш ефективними в цій галузі стають роботи з алгоритмізації процесів синтезу й аналізу.

Формулювання цілі статті. Мета роботи – сформулювати методику підготовки технологічних даних для синтезу об’єктів керування цифрових автоматних систем, на основі чого формується алгоритм управління технологічними процесами з використанням мікропроцесорних засобів.