

УДК 681.121.84

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/15>**Кулінченко Г.В.**

Сумський державний університет

Панич А.О.

Сумський державний університет

Журба В.О.

Сумський державний університет

Соколов С.В.

Сумський державний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ ПІДІГРІВУ ГАЗУ

Необхідність розробки моделі регулятора температури підігріву газу обумовлена перспективою використання таких регуляторів в установках, що використовуються в технологіях розподілу газу та інших додатках. Потреба підігріву потоку газу виникає при дроселюванні потоку, як при використанні дроселюючих пристроїв, так і детандерів. Детандер-генераторні агрегати (ДГА), забезпечуючи утилізацію надлишкового тиску газу магістралі, одночасно дозволяють покращити екологічний стан навколишнього середовища. Перепоною для підвищення ефективності процесів утилізації надлишкового тиску потоку газу є недосконалість систем керування процесами утилізації, зокрема підігріву газу. Врахування об'ємів використання засобів керування у газорозподільчих мережах України визначає актуальність досліджень, що ведуться у цій галузі.

Альтернативою для підігрівачів, що працюють за рахунок спалювання газу у точці розподілу потоку, є безвогневі підігрівачі. Можливість використання безвогневих підігрівачів базується на генераторах, що під'єднуються до турбіни детандера.

Ідеологія розробки систем керування процесами дроселювання будується відповідно до дії випадкових та детермінованих збурень параметрів потоку газу, що заважають стабілізації режимів функціонування всієї установки.

Досліджено канал керування температурою потоку газу, що надходить до турбіни турбодетандера. Оцінена ступінь впливу збурюючих факторів (витрати газу) на температуру потоку. Для керування нелінійним об'єктом, яким є підігрівач потоку газу, вибрано ШІМ регулятор, що реалізується на мікропроцесорному контролері та потужних комутуючих пристроях. Відповідно до енергозберігаючих принципів керування підігрівачем розроблені алгоритми програмного забезпечення регулятора. Практична значимість отриманих результатів полягає у можливостях вбудовування дослідженого локального регулятора в загальну систему керування установкою утилізації надлишкового тиску.

Ключові слова: енергозбереження, збурення параметрів, тепловий баланс, теплоелектричний нагрівач, ШІМ–регулятор.

Постановка проблеми. Процес розподілу природного газу зазвичай супроводжується зміною тисків на газорозподільних станціях (ГРС) та газорегуляторних пунктах (ГРП), і здійснюється шляхом дроселювання потоків. Один із напрямків енергозбереження процесу розподілу – це застосування детандер–генераторних агрегатів (ДГА) для отримання електроенергії за рахунок використання надлишкового тиску газу. Надлишковий тиск утворюється не тільки на газогонах системи газопостачання, але і в процесі генерації електроенергії на теплоелектростанціях.

Узагальнення завдань керування процесами генерації електроенергії показує, що на якість параметрів електроенергії впливає не тільки стабільність швидкості обертання агрегату турбіна/генератор. Суттєвим чинником впливу на ефективність процесів перерозподілу потоків газу, що супроводжуються ефектом дроселювання, є температура потоку та пов'язані з нею газофізичні параметри потоку, що дроселюється. Природними є заходи, які сприяли стабілізації параметрів потоку газу в умовах дії збурень по температурі потоку та його витрат.

Досить прийнятним у практичному використанні став процес підігріву газу, який дозволяє

значно зменшити випадання гідратів та вологи у вузлі дроселювання, а також покращити умови обертання турбіни. Це важливо і з огляду на те, що газові турбіни працюють не тільки на ГРП та ГРС, але й на різних рухомих об'єктах.

Спроби узагальнення підходу до керування підігрівом газу, що надходить до турбіни, не завжди видаються вдалимими, оскільки ці об'єкти керування відрізняються як конструктивно-технологічними параметрами, так і різними параметрами газових потоків. Тому при вирішенні питань побудови схеми підігріву газом головним питанням є методи підігріву. Виходячи із принципів організації теплового контакту носія тепла з потоком нагріву, формуються критерії подальшого удосконалення засобів керування процесом.

Крім завдань підвищення ефективності процесів обігріву, актуальним завданням для нашого часу залишається покращення екологічного стану навколо промислових об'єктів. Тому основні тенденції організації процесу обігріву газу базуються на використанні проміжних носіїв теплової енергії.

Конкуруючий напрямок побудови схем обігріву – від проектів, спрямованих на спрощення експлуатаційних заходів, спрямовується на дистанційне та автоматизоване керування об'єктами газопроводів [1]. Відповідно, розбудова засобів автоматизованого керування, що забезпечують ефективне керування енергопотоків, визначає актуальність завдань досліджень сьогодення.

Характер дії збурень параметрів керованого потоку газу, ускладнює використання класичних підходів до побудови *PID* – регуляторів, тим більше, для опису досліджуваного об'єкта керування (ОК) використовуються нелінійні функції.

Необхідність реалізації мікропроцесорних засобів керування згаданими установками обумовлює заходи по дослідженню моделей регуляторів, які б забезпечували необхідну якість перехідних процесів регулятора. Узагальнення результатів дослідження моделей регуляторів дають можливість практичного впровадження мікропроцесорних регуляторів у суміжних галузях промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглядаючи підходи до побудови підігрівачів потоку газу, можна констатувати, що вони в основному використовуються на газорозподільчих станціях в утилізаційних турбодетандерних агрегатах (УТДА) [2]. В залежності від місця використання, при підігріві газу використовуються спеціальні підігрівачі з проміжним носієм тепла – водою або паром. На ГРС або ГРП нагрівання зазвичай здійснюється від зовнішніх теплових джерел. У будь

якому варіанті розгляду процесу підігріву потоку газу встає питання ефективності керування цим процесом. Найбільш поширеним у газотранспортній галузі в наш час є підігрівач паливного та пускового газу ПТПГ-30, в якому використовується проміжний теплоносій з непрямым нагріванням [3].

Ігнорування специфічних умов експлуатації при використанні серійних підігрівачів такого типу, призводить до того, що теплова потужність більшості підігрівачів перевищує реальні потреби ГРС. Тому підігрівачі працюють недовантаженими, зменшуючи ККД установок ГРС.

До суттєвих недоліків підігрівачів такого типу можна також віднести певні витрати паливного газу на підігрівач («власні технологічні потреби»), зношення обладнання, викиди в атмосферу, складність в експлуатації паливного обладнання.

Заходи по підвищенню ефективності редукування природного газу на ГРС спрямовані на пошук альтернативних джерел тепла, що використовують енергію вітру, сонця та ін. Проте, залежність цих джерел від природно-кліматичних умов передбачає розробку комбінованих пристроїв, що значно підвищує кошторис проектів, зменшуючи ефективність установок.

Іншим напрямком досліджень процесів підігріву є безвогневі методи підігріву, наприклад, термоакустичного редуктора, який працює з використанням резонансного ефекту Гартмана – Шпренгера [4]. Експерименти, що здійснювалися з генератором Гартмана довели, що затрати на реконструкцію обладнання перебільшують ті здобутки, що отримують від цього пристрою.

Вихровий ефект Ранка – Хілша, що створює умови розділення теплових потоків, також використовується для підігріву потоку газу. Результати досліджень, що реалізовані в газорозподільчій мережі Італії, показують обмеженість практичного впровадження такого обладнання, оскільки воно ефективне в обмеженому діапазоні навколишніх температур та при високих значеннях перепаду тисків [5].

Враховуючи те, що у переважній кількості УТДА використовується для генерації електроенергії [6, 7], тобто турбодетандери використовуються в якості механічного приводу електрогенераторів, здається логічним будувати підігрівачі газу на базі електричних джерел теплової енергії.

До таких підігрівачів можна віднести підігрівач, в якому в якості проміжного теплоносія використовується мастило. Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання має позитивний

досвід із впровадження таких нагрівачів у республіці Казахстан (УОГ, м. Бозой), Узбекистан (УКПП, м. Шаркий Бердак, м. Мінгбулак).

Тому дослідження моделі регулятора температури підігріву газу слід вести, орієнтуючись на підігрівач із мастильним носієм тепла, де виключені витрати газу на власні потреби та викиди результатів спалюваного газу в навколишнє середовище.

Аналізуючи математичні моделі підігрівачів, що відомі на теперішній час, можна побачити, що деякі з них [8] характеризуються значною мірою деталізації (об'єкт п'ятого порядку), відповідними складнощами по реалізації *PID* – регулятора, який представлено ланкою лише другого порядку. При цьому необхідність застосування *PID* – регулятора ґрунтується на неточних вимірюваннях манометричного термометра та некоректних налаштуваннях релейного регулятора.

В інших моделях, що спрямовані на реалізацію системи керування нагрівачем непрямого нагріву [9], підігрівач представляється як об'єкт автоматизації. Після відповідної лінеаризації моделі такого нелінійного об'єкта можна побудувати регулятор для певного діапазону відхилень від вибраної робочої точки. Наступні кроки реалізації системи керування повинні передбачати заходи структурно-параметричного синтезу регулятора.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності роботи ДГА за рахунок використання мікропроцесорних засобів керування установкою підігріву потоку газу, що надходить до дросельного пристрою керування потоком газу. Для досягнення вказаної мети потрібно вирішити наступні завдання:

– оцінити вплив збурень параметрів потоку на стабільність утримання заданої температури;

– проаналізувати ефективність вибраного каналу керування;

– виконати структурно-параметричний синтез регулятора температури підігріву потоку газу.

Матеріали досліджень. Відповідно до прийнятої структури регулятора температури газового потоку, у схемі задіяні мастильний нагрівач на базі теплоелектричний нагрівач 4 (ТЕН) мастила 3, яке через стінки змійовика 2 передає теплову енергію потоку газу. Регулювання температурою потоку здійснюється регулятором 5 відповідно до заданого значення температури $T_{зад}$ та плинної температури потоку T_2 , яка утворилася в результаті нагрівання вхідного потоку з температурою T_1 . Збурення значень температури потоку утворюються внаслідок регулювання витрат потоку дроселем 7 шляхом впливу на дросельну засувку регулятора витрат 8. Регулювання витрат потоку пов'язано із забезпеченням необхідного моменту та швидкості обертання турбіни ДГА.

Структурна схема підігрівача ГРС представлена на рис. 1.

Для отримання математичної моделі мастильного підігрівача складемо рівняння балансу теплових енергій. При цьому вважаємо, що енергія, що акумулюється в просторі підігрівача E_A визначається різницею енергій, які надходять до нього та залишають його:

$$E_A = E_E + E_{In} - E_{Out} \quad (1)$$

де E_E – енергія, що передається в підігрівач від ТЕНА;

E_{In} – енергія, що надходить в підігрівач з потоком газу;

E_{Out} – енергія, яку випромінює підігрівач у навколишнє середовище.

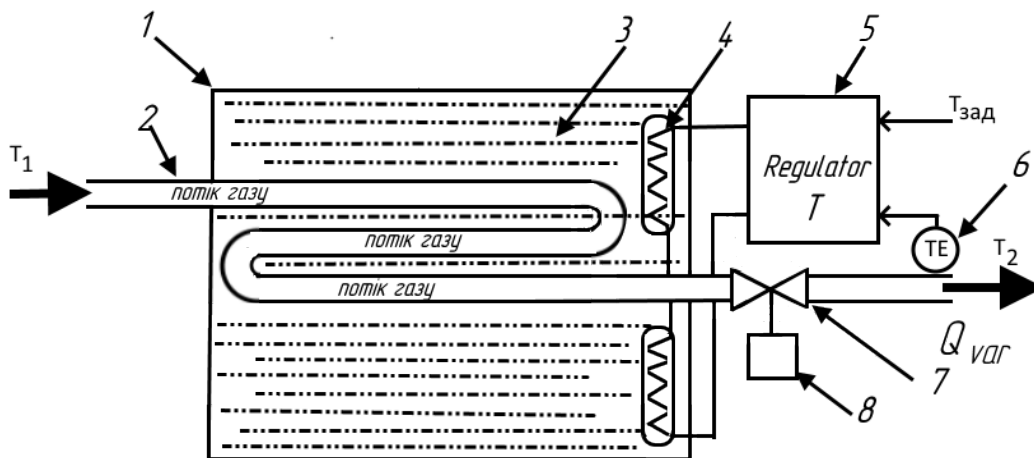


Рис. 1. Структурна схема підігрівача

1 – мастильний підігрівач; 2 – змійовик; 3 – мастило; 4 – ТЕН; 5 – регулятор температури; 6 – давач температури; 7 – дросель потоку газу; 8 – регулятор витрат турбіни

При цьому $E_E = U^2/R$

$$E_{Out} = g * A * (T_{out} - T_c) \quad (2)$$

$$E_{In} = Q * C_r * (T_{in} - T_{out}) = - Q * C_r * (T_{out} - T_{in})$$

- де U – напруга, що підводиться до ТЕНа;
 R – опір ТЕНа; g – коефіцієнт конвекції;
 A – площа поверхні підігрівача;
 T_{out} – температура потоку газу, що надходить у дроселюючий пристрій;
 T_c – температура навколишнього середовища;
 T_{in} – температура потоку газу, що надходить у підігрівач; Q – швидкість потоку газу;
 C_r – питома теплоємність газу.

Записані рівняння відображують обмін енергіями внаслідок зміни температури потоку на вході та виході підігрівача, а втрати енергії відбуваються внаслідок природної конвекції у навколишній простір з температурою T_c .

При такому описі підігрівач, він же теплообмінник, представляється як об'єкт із зосередженими параметрами, оскільки для отримання необхідної температури на виході обігрівача потреби в інформації щодо розподілу теплового поля у його просторі немає. При цьому вважаємо, що сталі часу теплових процесів набагато більше ніж тривалість керуючих впливів. Крім того вважаємо, що сталі часу теплових процесів набагато більше ніж тривалість керуючих впливів.

Якщо прийняти, що середня температура потоку T_{out} , що витікає із підігрівача, наближена до температури мастила у просторі підігрівача, то це дає змогу записати рівняння теплового балансу у вигляді диференційного рівняння:

$$m_m * C_m \frac{dT_{OUT}}{dt} = \frac{U^2}{R} - Q * C_r * (T_{OUT} - T_{IN}) - g * A * (T_{OUT} - T_c) \quad (3)$$

де C_m, m_m – питома теплоємність та маса мастила у підігрівачу.

Використовуючи позначення:

$$T_i = C_m, m_m; \quad k_c = g * A \quad (4)$$

та рівняння (3), в середовищі MATLAB Simulink будується математичну модель досліджуваного обігрівача, схема якої зображена на рис. 2.

Як видно із рівнянь і отриманої моделі, ОК описується аперіодичною ланкою першого порядку. Затримка сигналу по каналу вимірювання температури, яка характерна для давачів температури, суттєво на динаміку об'єкта керування не впливає.

Перший крок побудови моделі полягає в отриманні перехідної характеристики об'єкта, що дозволяє скорегувати коефіцієнти моделі на основі експериментальних даних. Практична оцінка параметрів моделі здійснювалася шляхом виміру часу, який необхідний для нагрівання робочого тіла нагрівача до певної температури [10]. Як і очікувалося, характер кривої відповідає аперіодичному процесу, а стала часу нагрівача залежить від маси мастила m_m , яке завантажено у підігрівач, тобто від необхідного значення енергії теплового потоку. Слід зауважити, що зазвичай передатні функції теплообмінників представляються аперіодичними ланками другого порядку. Причина відмінності опису класичного теплообмінника і термopідігрівача пояснюється мінімальними кінематичними зрушеннями потоку гріючого агента. Крім того, сам нагрівач представляється об'єктом із зосередженими параметрами.

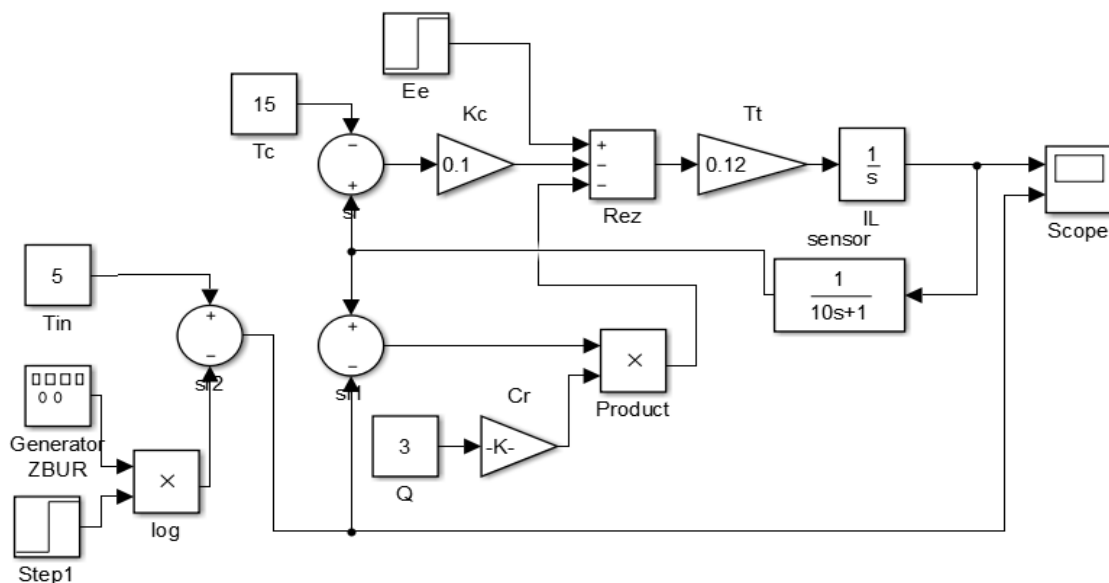


Рис. 2. Схема моделі підігрівача

Наступний крок дослідження моделі передбачає оцінку ступеня впливу збурень параметрів об'єкту на вихідну температуру потоку, що надходить на дроселювання. Збурюючими впливами на температуру T_{out} є зміни витрат потоку Q та вхідна температура потоку T_{in} підігрівача.

В моделі, що зображена на рис. 2, введено симулятор збурень, який вмикається у час закінчення перехідного процесу (100 с) після вмикання термоелектричного нагрівача (ZBUR). На рис. 3 показані зміни вихідного сигналу в результаті дії зазначених збурень.

Із приведених осцилограм видно, що при однакових відносних змінах параметрів впливу, чутливість до збурень каналу «витрати потоку/вихідна температура» більша, ніж каналу « T_{in}/T_{out} ».

Звертаючись до структури регулятора каналу керування «електротермонагрівач/температура», що стабілізує температуру підігрівача, основним

питанням є метод регулювання. Цей метод визначається виконавчим механізмом, який керує тепловим потоком, а також сталими часу ОК, які визначаються на етапі ідентифікації його параметрів.

З огляду на значення сталих часу нашого ОК, цілком прийнятним було б використання PD -регулятора, оскільки використання інтегральної складової в реальному регуляторі не має сенсу. Проте, керуючись міркуваннями енергозбереження, досить перспективним здається застосування ШІМ (Широтно імпульсна модуляція) – контролера в комбінації з PD -регулятором [11].

Додавання пропорційної складової дає змогу зменшити амплітуду автоколивань, як видно із результатів моделювання схеми ШІМ регулятора (рис. 4а), та осцилограми вихідного сигналу (рис. 4б).

Такий регулятор досить просто реалізується на контролері МК-127/301(Ів– Франківськ) [12] на мові FBD та ПЛК фірми Siemens –S7-400.

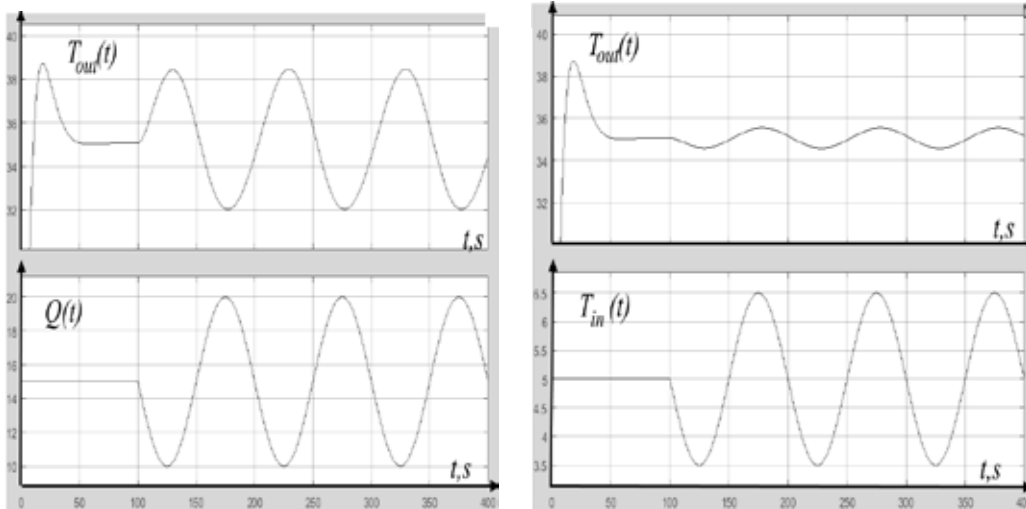


Рис. 3. Осцилограми результатів дії збурень на температуру потоку

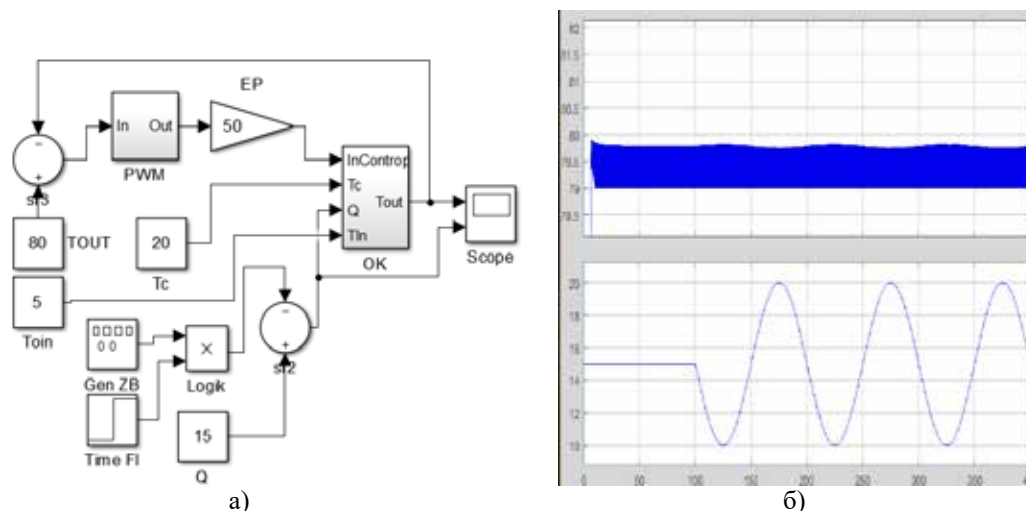


Рис. 4. Схема моделювання процесу ШІМ регулятора (а) та осцилограма вихідного сигналу (б)

Висновки. Відповідно до поставленої мети, яка передбачає подальше підвищення ефективності функціонування утилізаційних ДГА, розроблена модель підігрівача потоку газу. Актуальність досліджень визначається перспективою впровадження таких регуляторів не тільки в схемах з використанням ДГА, а й на ГРС та ГРП, де задіяні технологічні операції дроселювання потоків газу.

Використання безвогневого підігрівача дає змогу скоротити витрати газу на власні потреби та покращити екологічні параметри установки.

Побудова моделі підігрівача, який по опису його моделі є нелінійним, не передбачає кроків

по лінеаризації опису моделі. Такий підхід зумовлений тим, що на етапі впровадження загальної мікропроцесорної системи керування процесом утилізації надлишкового тиску прогнозується використання ШІМ регулятора температури. Цей регулятор передбачається підпорядкувати зовнішньому контуру керування витратами потоку газу, що надходить на дроселювання або ДГА.

В дослідженнях оцінені результати компенсації збурень параметрів потоку газу і підтверджена доцільність вибору ШІМ регулятора температури безвогневого обігрівача. Розглянута можливість побудови регулятора на мікропроцесорних засобах, що наявні на ринку.

Список літератури:

1. Крупка В.О., Іваник Є.Б., Марчук О.М., Федотова С.Ю. Сучасна техніка і технології ремонту лінійної частини магістральних трубопроводів. Нафтогазова енергетика. 2011. № 3(16). С. 12–29.
2. Ярошенко В. М. Ексергетичний аналіз процесів енергозбереження в газотранспортній системі. Холодильна техніка та технологія, 58 (1), 2022. С. 40–49.
3. Посмак М.П., Райнов Б.М., Сычев С.Л., Черемисин О.Р. Каскадное управление подогревателями газа на ГРС. Трубопроводный транспорт. 2013. 3(81) 2013. С. 28–31.
4. Schipachev, A.M., Dmitrieva, A.S. Application of the resonant energy separation effect at natural gas reduction points in order to improve the energy efficiency of the gas distribution system. Journal of Mining Institute. 2021, 248(2), pp. 253–259
5. Danieli P., Masi M., Lazzaretto A., Carraro G. Volpato G. A smart energy recovery system to avoid preheating in gas grid pressure reduction stations. Energies 2022, 15, 371 <https://doi.org/10.3390/en15010371>.
6. Черных А.П., Васильев А.И. Использование перепада давления газа, редуцируемого на ГРС и ГРП для получения электроэнергии и тепла. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. 3/12 (63). С. 73–75.
7. Мавжудова Ш.С., Усмонов Н.О. Использование потенциальной энергии сжатого природного газа для выработки электрической энергии. Наука, техника и образование, 2016. С. 49–52.
8. Федоришин Р.М. Моделирование системы подогреву природного газа на автоматизованих газорозподільних станціях. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка» 2006. С. 22–33.
9. Горбійчук М.І., Когутяк М.І, Гарасимів В.М. Математична модель підігрівача з проміжним теплоносієм. Методи та прилади контролю якості. 2021. № 2 (47). С. 83–95. DOI:10.31471/1993-9981-2021-2(47)-83-95
10. Defendi R.O., Paraiso P.R., Jorge L.M.M. Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime. Engvista. 2021. V. 17. №. 3, p. 421–432.
11. Yajie Zhu et al. Design and Implementation of Micro Temperature Control System Based on PWM. IOP. 2019. Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 677, 032004. DOI:10.1088/1757-899X/677/3/032004
12. http://www.microl.ua/PDF/PDF_MIK-127/301_Trexfordturnyi_PID-SHIM_reg

Kulinchenko H.V., Panych A.O., Zhurba V.O., Sokolov S.V. MODELING OF THE GAS HEATING TEMPERATURE REGULATOR

The need to develop a gas heating temperature regulator model is due to the prospect of using such regulators in installations used in gas distribution technologies and other applications. The need to heat the gas flow arises when throttling the flow, both when using throttling devices and expanders. Expander-generator units (DGA), ensuring the disposal of excess pressure of main gas, simultaneously allow to improve the environmental condition of the environment. An obstacle to improving the efficiency of the processes of utilization of excess pressure of the gas flow is the imperfection of the management systems of the utilization processes, in particular, gas heating. Taking into account the volumes of use of control tools in gas distribution networks of Ukraine determines the relevance of research conducted in this field.

An alternative to heaters that work by burning gas at the flow distribution point are flameless heaters. The possibility of using flameless heaters is based on generators connected to the expander turbine.

The ideology of developing control systems for throttling processes is built according to the action of random and deterministic disturbances of gas flow parameters, which interfere with the stabilization of the operation modes of the entire installation.

The temperature control channel of the gas flow entering the turboexpander turbine was investigated. The degree of influence of disturbing factors (gas flow) on the temperature of the flow is estimated. To control a non-linear object, which is a gas flow heater, a PWM controller implemented on a microprocessor controller and powerful switching devices was chosen. In accordance with the energy-saving principles of heater control, the algorithms of the controller software were developed. The practical significance of the obtained results lies in the possibilities of embedding the investigated local regulator into the general control system of the overpressure utilization plant.

Key words: *energy saving, parameter perturbation, heat balance, thermoelectric heater, PWM controller.*