

67-72-73/2
29.04.2021

ВІДГУК

офіційного опонента про дисертаційну роботу Химко Ольги Мирославівни на тему: «Математичні моделі, методи та алгоритми для автоматизації управління газотранспортними системами», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування до спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 у Національному університеті «Львівська політехніка»

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

В умовах конкуренції успіхи виробничо-збутових компаній багато в чому визначаються ефективністю відповідної логістики. Типовим прикладом логістичних об'єктів є регіональні газотранспортні системи (ГТС). Вони являють собою складні організаційно-технічні об'єкти, які мають у своєму складі магістральні газопроводи, розподільні мережі, газосховища, компресійні, газовимірювальні станції, засоби автоматики й підрозділи управління. Для підвищення ефективності процесів функціонування таких об'єктів необхідною є комплексна автоматизація на всіх рівнях управління ними. Це передбачає розробку математичних моделей фізичних, технологічних, інформаційних і бізнесових процесів для всього життєвого циклу об'єктів. При цьому до теперішнього часу розв'язання задач автоматизації технологічних процесів і комп'ютеризації управління ГТС здійснювалось на основі методології, яка не забезпечує інформаційну сумісність засобів на оперативному та стратегічному рівнях. На цій основі виникає **протиріччя** між потребами практики та можливостями сучасної методології автоматизації управління газотранспортними системами. Це обумовлює **актуальність теми** дисертаційного дослідження, яке присвячене вирішенню науково-прикладної проблеми розроблення концепції побудови програмно-технічної системи для автоматизації управління ГТС та відповідних математичних моделей, методів і алгоритмів для керування процесами транспортування газу.

Свідченням актуальності теми дисертаційного дослідження є також те, що воно проведено в рамках низки держбюджетних і договірних робіт за темами, які виконувались у Національному університеті «Львівська політехніка» та Центрі математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача Національної академії наук України у період з 2004 по 2020 рік, в яких здобувачка брала безпосередню участь як виконавець. Темі держбюджетних робіт і договорів повністю відповідають темі, меті і задачам дисертаційної роботи.

СТРУКТУРА, ЛОГІКА ТА ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 177 найменувань, двох додатків і має загальний обсяг 452 сторінки.

Вступна частина дисертації розкриває суть, структуру і сучасний стан розв'язуваної у дисертаційній роботі науково-прикладної проблеми. У ній наведена загальна характеристика роботи, яка містить відомості щодо виконаного дисертаційного дослідження згідно з існуючими вимогами: актуальність теми; зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами; формулювання мети і задач дослідження; перелік використаних методів дослідження; одержані нові наукові результати; практичне значення одержаних результатів; декларацію особистого внеску здобувача; відомості про апробацію результатів та публікації за темою дисертації.

Оглядова частина роботи присвячена огляду сучасного стану проблеми автоматизації управління газотранспортними системами. У ній виконано узагальнений аналіз публікацій за темою дослідження, аналіз газотранспортних систем як об'єктів автоматизації, наведено опис логістичних і фізичних процесів, що протікають в них. Визначено, що логістичні бізнес-процеси створюють додаткову вартість і є визначальними для її функціонування як економічної системи, а сама ГТС являє собою нелінійну керовану динамічну систему з розподіленими параметрами.

За результатами аналізу структури управління та стану автоматизації ГТС України відмічено, що сучасний стан управління нею сформувався шляхом розрізненої автоматизації окремих об'єктів газотранспортної інфраструктури, окремих технологічних процесів і напрямків управління, а ефективність системи управління нею обмежується відсутністю автоматизованого обміну даними між рівнями стратегічного управління та керування технологічними процесами.

Виходячи з цього, автором сформульована **мета дослідження**, що передбачає розроблення математичних моделей, методів і алгоритмів розв'язання задач керування стаціонарними та перехідними режимами течії газу в магістральних газопроводах, виявлення та ідентифікації витоків в них, концепції автоматизації управління газотранспортною системою України, яка базується на теорії систем оперативного управління виробництвом і моделі функціональної ієрархії корпорації відповідно до міжнародного стандарту ANSI/ISA-95.

Теоретична частина роботи присвячена розробці математичних моделей для управління потоками в магістральних газопроводах, методів та алгоритмів розв'язування задач моделювання процесів транспортування газу, контролю цілісності лінійних частин газопроводів та удосконаленню підходу до автоматизації управління газотранспортною системою України.

У другому розділі роботи розроблені математичні моделі для основних технологічних задач керування потоками газу в магістральних газопроводах. На першому етапі виконано формалізацію опису газотранспортної системи з використанням моделі структури, яка описує зв'язки між її елементами, властивості елементів і множину методів, з використанням яких формується модель конфігурації системи. Гнучкість запропонованої форми подання системи дозволяє адаптувати рівень деталізації її опису у залежності від особливостей розв'язуваної задачі управління. Для встановлення властивостей лінійних і вузлових елементів системи на основі законів збереження маси, імпульсу й енергії автором сформульовані диференціальні математичні моделі динаміки

газу в них, а також умови спряження ключових функцій моделей на межах контактів елементів. Для визначення інтенсивності витоку через негерметичність стінок труб або нещільність з'єднань запропонована математична модель локального витоку у залежності від тиску та температури газу в трубі в околі місця розгерметизації. Комплексування системи рівнянь динаміки для всіх лінійних і вузлових елементів, умов спряження ключових функцій, початкових та крайових умов дозволило отримати узагальнену математичну модель для опису течії газу в секції магістрального газопроводу для перехідних режимів його експлуатації. Її спрощення, в якому не враховується інерційність мас газу, накопичених у внутрішніх порожнинах вузлових елементів, дозволило вилучити з моделі структури їхні секції, а в моделі течії замінити звичайні диференціальні рівняння скінченними співвідношеннями, які враховують їх гідравлічний опір. Використовуючи модель віртуального вузлового елемента вдалося досягти суттєвого спрощення моделі течії газу в секції, лінійні елементи якої є відрізками труб одного діаметра.

Третій розділ присвячено дослідженню моделей керування перехідними процесами шляхом зміни густини на вході та виході трубопроводу, контролю на вході зміни в часі густини, а на виході густини масового потоку, зміни в часі густини потоку маси на вході та густини на виході Вони відповідають крайовим задачам для рівнянь динаміки газу у довгому трубопроводі за ізотермічного наближення. При цьому використано моделі чотирьох функцій керування, які визначаються чотирма дійсними числами: два значення контрольованого параметра, які відповідають стаціонарним режимам та два часові параметри, що визначають моменти початку і завершення зміни функції керування. Значеннями часових параметрів можна визначати швидкість зміни функції керування та змінювати часовий зсув між функціями на вході та виході трубопроводу. Для нелінійної моделі динаміки газу в довгому трубопроводі сформульовані задачі оптимального керування стаціонарними потоками в магістральному трубопроводі та запропоновано чисельний метод для їхнього розв'язання.

Четвертий розділ присвячено розробці математичної моделі для дослідження поширення незначних збурень у потоці газу. Запропонована модель включає лінійну систему рівнянь з частинними похідними, а її коефіцієнти є функціями координати та часу, які визначаються через параметри незбуреного потоку. Встановлено, що для стаціонарного початкового режиму параметри залежать лише від просторової координати, а модель трансформується до рівняння гіперболічного типу зі змінними коефіцієнтами, значення яких суттєво визначаються режимом течії. На основі запропонованої моделі сформульована задача визначення хвильового поля збурення, яке виникає в наслідок локальної флуктуації тиску. З використанням методики на основі методу скінченних різниць здійснено чисельне моделювання поля залежно від місця виникнення флуктуації та режиму течії. Запропонована модель поширення збурень дозволяє створювати методи виявлення витоків шляхом реєстрації хвиль тиску, які виникають внаслідок раптової локальної розгерметизації трубопроводу.

У п'ятому розділі роботи запропоновані математичні моделі та методи для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу шляхом послідовного контролю лінійних і вузлових елементів кожної секції. З цією метою на основі моделі динаміки газу для стаціонарних режимів експлуатації розроблено метод, який на основі даних вимірювання тиску на вході, виході та в контрольних точках[дозволяє виявляти витoki, оцінювати їхню інтенсивність та встановлювати місця розгерметизації трубопроводу. Запропоновано критерії оцінки цілісності лінійних елементів, на основі яких для нестационарних режимів розроблено метод неперервного контролю цілісності газопроводу. Його реалізація передбачає використання даних моніторингу тиску і температури газу на входах і виходах вузлових елементів, а також швидкості потоку на вході першого вузлового елемента. Ще одним цікавим результатом є метод контролю цілісності вузлових елементів, який базується на аналізі параметрів хвиль акустичної емісії, що спричиняються витокom газу через отвір у стінці трубопроводу. На основі розроблених математичних моделей і методів

запропонована структура системи контролю цілісності секцій лінійних частин, ділянок секції лінійних частин, вузлових елементів і магістрального газопроводу в цілому.

Шостий розділ присвячено розробці підходу до автоматизації управління газотранспортною системою України, який призваний забезпечити ефективність автоматизованого обміну інформацією між системами управління технологічними процесами та стратегічного управління шляхом усунення їх інформаційної несумісності. Для розв'язання цього завдання автором обрано підхід на основі сучасної методології побудови MES-систем оперативного управління з використанням еталонної моделі управління підприємством PERA. У рамках обраної методології з використанням апарату теорії графів запропоновано моделі бізнес-процесів транспортування і зберігання газу, фізичних процесів у спорудах і газі газотранспортної системи. З використанням методології моделювання IDEF0 здійснено аналіз функцій управління газотранспортною системою як специфічної логістичної системи, яка має ознаки дискретних і неперервних об'єктів. На цій основі розроблено модель управління нею, що має в своєму складі інформаційну модель та модель активності на рівні оперативного управління системою. Це дозволило запропонувати структуру програмно-апаратного комплексу для автоматизації управління газотранспортною системою, визначити функції програмно-технічних підсистем різних рівнів управління та склад математичного забезпечення.

Додатки містять опис результатів дослідження розроблених математичних моделей методів і алгоритмів для контролю балансу газу на ділянці магістрального газопроводу, акти про впровадження результатів дисертаційної роботи в проектні організації і навчальний процес закладу вищої освіти.

Зміст дисертаційної роботи відповідає її темі, меті та задачам дослідження. У викладенні результатів дослідження просліджується певна послідовність, етапи дослідження взаємопов'язані і вирішують

локальні задачі, розв'язання яких у сукупності дозволяє досягти поставленої мети дослідження.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлені у 34-х наукових працях здобувача, серед яких два розділи в закордонних монографіях, 18 статей – у фахових виданнях України, одна стаття – у науковому періодичному виданні держави, що входить до Європейського союзу, два патенти України, 8 публікацій – у збірниках праць і тез міжнародних конференцій (5 публікацій реферовані в наукометричній базі SCOPUS).

Особистий внесок автора у спільних публікаціях відповідає темі, змістові дисертаційної роботи та положенням, що виносяться на захист.

Автореферат, загалом, адекватно відображає обсяг, зміст, основні положення та висновки дисертаційної роботи.

НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У дисертаційній роботі наведено розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми розроблення концепції побудови програмно-технічної системи для автоматизації управління ГТС та відповідних математичних моделей, методів і алгоритмів для керування процесами транспортування газу.

При цьому отримано ряд наукових результатів, що мають переваги над існуючими:

- розроблено дворівневу математичну модель структури ГТС, яка дозволяє враховувати зміни її конфігурації в процесі експлуатації, а також її розмірну гетерогенність, пов'язану з наявністю у її складі лінійних і вузлових елементів;

- розроблені нелінійні математичні моделі течії газу в лінійних та вузлових елементах магістрального газопроводу на основі рівнянь його динаміки, що надає можливість забезпечувати оперативне балансування маси газу в ньому;

- набули подальшого розвитку методи скінченно-різницевої дискретизації ключових рівнянь за просторовою координатою, методи

ітераційного підходу та методи Рунге-Кутти-Фельберга для розв'язування сформульованих нелінійних прямих задач, що дозволяє спрощувати дослідження моделей течії газу;

– розроблено математичну модель поширення малих збурень потоку газу в трубопроводі, яка описує хвильові процеси, спричинені нестабільністю роботи компресорів, локальною розгерметизацією, флуктуаціями тиску, густини й температури, що надає можливості виявляти локальні розгерметизації та ідентифікувати витоки;

– розроблені моделі керування перехідними процесами, з використанням яких будь-який процес переходу з одного стаціонарного режиму в інший визначається скінченним набором числових параметрів, що дає змогу визначити ефективність транспортування газу під час перехідних режимів, а також проводити кількісні дослідження перехідних процесів течії газу в секції магістрального газопроводу для різних моделей керування;

– розроблені математичні моделі локального витоку із магістрального газопроводу, які визначають інтенсивність його витікання залежно від тиску й температури газу в трубі в околі місця розгерметизації, що надає можливість кількісної оцінки параметрів течії, на основі яких можна виявляти й ідентифікувати витоки;

– запропонована концепція автоматизації управління газотранспортною системою України, яка базується на теорії систем оперативного управління виробництвом MES і моделі функціональної ієрархії корпорації PERA відповідно до міжнародного стандарту ANSI/ISA-95.

НАУКОВЕ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати розширюють науково-методологічну основу для підвищення ефективності процесів управління газотранспортними системами в частині їх автоматизації та розвитку засобів математичного моделювання процесів транспортування

газу. Практична реалізація розробленої концепції поетапної модернізації газотранспортної системи України дозволить забезпечити автоматичний обмін даними між підсистемами стратегічного управління, керування технологічними процесами та в межах окремих рівнів управління.

Теоретичні результати дисертаційної роботи використані при визначенні функцій та розробці структури програмної системи для автоматизації управління газотранспортною системою, а також системи моніторингу цілісності магістральних газопроводів у її складі.

Практична значущість результатів дисертаційної роботи підтверджується їхнім впровадженням у Науково-дослідному інституті транспорту газу акціонерного товариства «Укртрансгаз» в складі програмного комплексу диспетчерського управління для розв'язання задач планування і прогнозування режимів роботи газотранспортної системи, у товаристві з обмеженою відповідальністю «Оператор газотранспортної системи України» під час розроблення планів розвитку ГТС України, проекту «SCADA», який включений у десятирічний «План розвитку газотранспортної системи на 2021-2030 роки» та у навчальний процес національного університету «Львівська політехніка».

ОБҐРУНТОВАНІСТЬ ТА ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

Вихідні положення дисертаційної роботи є коректними. Запропоновані у роботі підхід, математичні моделі, методи і алгоритми розв'язання частинних задач проблеми базуються на відомих методології системного підходу, моделі газової динаміки, методах математичного моделювання, теорії автоматичного керування, дискретизації систем рівнянь із частинними похідними, ітераційних методах розв'язування систем нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, еталонній моделі PERA, стандартах ANSI/ISA-88 та ANSI/ISA-95, методології моделювання IDEF0 та сучасних інформаційних технологій.

Отримані результати, зроблені висновки і рекомендації є аргументованими, їх достовірність підкріплюється коректністю

постановок задач газової динаміки та строгістю математичних викладок, співпаданням результатів з результатами теоретичних і експериментальних досліджень, перевіркою працездатності розроблених моделей, методів, алгоритмів, а також їхнім практичним впровадженням. Зокрема, проведені натурне і модельне дослідження балансу газу на ділянці магістрального газопроводу КС Красилів – ПВВГ Дідушичі підтвердило достатньо високу точність розробленої математичної моделі динаміки газу в магістральних газопроводах.

Свідченнями обґрунтованості та достовірності результатів дисертаційної роботи можуть слугувати також їхня публікація у високорейтингових наукових фахових виданнях з технічних наук та апробація у середовищі фахівців на міжнародних науково-технічних конференціях.

ЗАУВАЖЕННЯ ЩОДО ЗМІСТУ Й ОФОРМЛЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ТА АВТОРЕФЕРАТУ

1. У вступній частині роботи, де обґрунтовується актуальність теми дослідження, та у висновках оглядового розділу роботи, доцільно було б **на основі існуючого протиріччя** між вимогами сучасної практичної діяльності в галузі автоматизації управління газотранспортними системами й можливостями існуючих теорій **чіткіше сформулювати науково-прикладну проблему**, розв'язання якої дозволить вирішити його. У тексті роботи про розв'язання такої проблеми йдеться лише при викладенні основних результатів і висновків.

2. В оглядові частині роботи (розділ 1) за результатами опрацювання більш як 40 переважно сучасних публікацій у вітчизняних і закордонних виданнях наведені лише назви задач проблеми. Проте відсутні приклади постановок задач, їх математичних моделей, методів їх розв'язання, засобів автоматизації, що їх реалізують, та визначення їх недоліків.

3. У теоретичній частині роботи доцільно було б навести системологічну модель проблеми розроблення концепції побудови програмно-технічної системи для автоматизації управління ГТС, яка б дозволила відобразити взаємозв'язки всього комплексу її задач за вхідними і вихідними даними, визначати вимоги до їх точності, форм їх подання тощо, що є необхідним при створенні цілісної системи автоматизації.

4. Відомо, що під час компресування газ істотно нагрівається, зміна його температури може також спостерігатись в місцях переходів через природні та штучні перешкоди. Разом з тим, у рівнянні, що описує перенесення імпульсу (2.42), використано ізотермічне наближення, в якому температуру газу T вважають незмінною в часі й однорідною по всій довжині ділянки трубопроводу L . При цьому не наведено оцінки можливої похибки моделі, пов'язаної з використанням такого наближення.

5. Через відсутність методики розрахунку в термодинаміці функції кінетики наростання потоку від нуля до усталеного значення $H_{\Delta_t}(\dots)$ і функції, що визначає зону локалізації витoku $\delta_{\Delta_x}(\dots)$, їх задано феноменологічно у вигляді (2.104). З цією метою можуть бути використані функції Гауса, Харрінгтона, логістична функція. Проте у роботі відсутнє обґрунтування саме такого вибору.

6. Для запропонованих математичних моделей (розділ 2) і методів моделювання процесів транспортування газу магістральними газопроводами (розділ 3) не наведено порівняльних чи абсолютних оцінок точності, часової складності та чутливості до похибок вимірювання початкового стану процесу та його параметрів.

7. Не зовсім коректним з точки зору математичного моделювання є вирази на кшталт «ідентифікація параметрів математичних моделей» (с. 57, 140, 419). Вочевидь мова повинна йти про параметричний синтез моделей або про ідентифікацію відповідних процесів.

8. Незважаючи на твердження, що для газотранспортної системи характерними є «істотна невизначеність її актуального технічного стану, а також розмитість вхідних даних, які використовують для формування режимів її експлуатації» (с. 22), «значна невизначеність значень внутрішніх параметрів і зовнішніх чинників» (с. 45), запропоновані у роботі математичні моделі засновані на використанні лише чіткої математики.

9. Для вирішення науково-прикладної проблеми автором використано класичний індуктивний підхід, у межах якого здійснювався перехід від рішень локальних задач моделювання до розробки підходу для автоматизації управління газотранспортною системою України шляхом злиття окремих компонентів, які розроблялися роздільно. Проте такий підхід не орієнтує на отримання глобально оптимальних рішень на рівні стратегічного управління.

10. Матеріал підрозділу 6.1, що присвячений опису MES-системи комп'ютеризації оперативного управління виробництвом та пов'язаним з нею стандартів, носить оглядовий характер і не відображає особливостей задач автоматизації управління газотранспортними системами.

11. Зауваження щодо оформлення дисертації та автореферату:

– номери посилань на публікації здобувача, наведені у вступі й основній частині дисертації, не співпадають;

– у дисертаційній роботі відсутній обов'язковий додаток зі списком публікацій здобувача за темою дисертації, як це передбачено п. 13 діючих «Вимог до оформлення дисертації»;

– по тексту дисертації та автореферату зустрічаються граматичні помилки та неточності, дублювання позначень у формулах тощо;

– висновки по роботі не відображають повною мірою переваги отриманих наукових, практичних результатів і перспектив подальших досліджень у цій галузі.

Наведені зауваження дещо погіршують враження про розглянуту роботу, проте не знижують загальний рівень одержаних у ній наукових та практичних результатів.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Незважаючи на зазначені недоліки, дисертаційна робота Химко О. М. «Математичні моделі, методи та алгоритми для автоматизації управління газотранспортними системами» є завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові теоретичні і практичні результати, що у сукупності є суттєвими для розвитку методології моделювання й автоматизації процесів управління газотранспортними системами. Вони відповідають формулі та напрямкам досліджень, зокрема, за пунктами «Формалізація завдань керування складними організаційно-технічними об'єктами ...», «Моделювання об'єктів і систем керування ...», «Ідентифікація та контроль параметрів об'єктів керування ...» паспорта спеціальності 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Вважаю, що за обсягом досліджень, актуальністю, науковою новизною і практичним значенням отриманих результатів, їх впровадженням та опублікуванням дисертаційна робота відповідає вимогам чинних нормативних документів, у тому числі пунктам 9, 10, і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Химко Ольга Мирославівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Офіційний опонент,
професор кафедри системотехніки
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор технічних наук,
професор



Безкоровайний В.В.

«Підпис Безкоровайного В.В. засвідчую».

Учений секретар
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
кандидат технічних наук, доцент



Магдаліна І.В.