



ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТРУБОПРОВОДОМ ТРАНСПОРТУВАННЯ НАФТИ З ВИКОРИСТАННЯМ WEB-ТЕХНОЛОГІЙ ОБМІНУ ДАНИМИ

Кучмистенко О. В.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0457-7611>

e-mail: kafatp@ukr.net

Анотація. Об'єктом дослідження в роботі є система автоматизованого керування трубопроводом транспорту нафти з інтегрованими Web-технологіями обміну даними. Метою роботи є створення інтелектуальних трубопроводів із вбудованими системами автоматизації для забезпечення оптимізації процесів транспортування нафти та нафтопродуктів, підвищення ефективності, безпеки і економічності експлуатації трубопровідних систем. Проведено огляд сучасних підходів до автоматичного керування трубопроводами із застосуванням методів оптимального керування, машинного навчання, генетичних алгоритмів та Web-інтерфейсів. Виявлено актуальні напрями розвитку таких систем у контексті цифрової трансформації нафтогазової галузі. Запропоновано математичну модель, що описує динаміку трубопровідної системи з урахуванням гідродинамічних і теплотехнічних параметрів, сенсорних даних про тиск, витрати, температуру та геопросторове положення. Система керування реалізується через локальні контролери насосних станцій та центральний сервер із Web-інтерфейсом, що забезпечує обчислення оптимальних керуючих дій за допомогою принципу максимуму Понтрягіна, динамічного програмування або алгоритмів машинного навчання. Здійснено експериментальну реалізацію системи керування на трубопроводі, розташованому на похилій місцевості, з використанням Web-технологій в архітектурі клієнт-сервер на базі Node.js та Socket.IO. Наведено результати візуалізації та моніторингу даних на інтерактивних картах Google Maps у режимі реального часу. Оцінено ефективність запропонованого підходу, що підтверджує можливість його практичного застосування для керування нафтотранспортними системами складної конфігурації.

Ключові слова: інтелектуальні трубопроводи, автоматизовані системи керування, Web-технології, транспортування нафти, оптимізація перекачування, математичне моделювання, машинне навчання.

Вступ

Традиційний підхід до створення трубопроводів характеризується низкою недоліків та обмежень. По-перше, етап проектування вимагає залучення висококваліфікованих інженерних кадрів, які використовують спеціалізоване програмне забезпечення для розрахунків траси, розміщення насосних станцій,

підбору потужностей обладнання тощо. Цей процес є тривалим і дорогим. По-друге, візуалізація проєкту обмежується паперовими кресленнями та схемами, що ускладнює сприйняття та взаємодію між учасниками проєкту. По-третє, під час експлуатації контроль режимів роботи здійснюється персоналом вручну або частково автоматизовано, що не забезпечує

Запропоноване посилання: Кучмистенко, О. В. (2025). Дослідження структури системи автоматизованого керування трубопроводом транспортування нафти з використанням WEB-технологій обміну даними. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 164-178. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-164-178

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

оптимальних параметрів перекачування та призводить до зайвих витрат ресурсів. Нарешті, транспортування різних речовин потребує резервуарних парків для їх зберігання та перемикання, що збільшує капітальні та експлуатаційні витрати.

Запропоновано новий підхід, який полягає у розробці інтелектуальних труб з вбудованою системою автоматизації та Web-технологіями, що дозволяє подолати зазначені недоліки. Основними перевагами такого рішення є:

1. Спрощення процесу проєктування та будівництва трубопроводів. Вибір оптимальної траси, розміщення насосних станцій та розрахунок їх потужності виконується автоматично системою з урахуванням геодезичних даних місцевості, фізичних параметрів труб та робочих речовин. Це усуває необхідність залучення висококваліфікованих інженерів та зменшує ризик людських помилок;

2. Візуалізація проєкту на інтерактивних картах у Web-інтерфейсі. Уся інформація про трасу трубопроводу, розташування насосних станцій, режими роботи тощо представлена у зручному візуальному форматі, доступному всім учасникам проєкту. Це полегшує розуміння, планування та взаємодію;

3. Автоматичне керування режимами роботи для забезпечення оптимальних параметрів перекачування (тиску, витрати) на всіх ділянках. Інтелектуальна система мінімізує енергоспоживання та знос обладнання, підвищуючи ефективність і термін експлуатації;

4. Можливість транспортування різних речовин без проміжного зберігання у резервуарних парках. Узгоджена робота всіх елементів трубопровідної системи дозволяє динамічно змінювати режими перекачування різних речовин послідовно через одну систему труб, що скорочує капітальні та експлуатаційні витрати;

5. Підвищення надійності та безпеки експлуатації завдяки вбудованим сенсорам контролю цілісності труб, просторового положення тощо. Система здатна виявляти потенційні загрози та пошкодження, відповідним чином реагуючи на них;

6. Універсальність та масштабованість. Інтелектуальні труби є модульними елементами, з яких можна швидко збирати трубопровідні системи будь-якої складності без залучення висококваліфікованих кадрів.

Отже, розробка нового виду інтелектуальних труб з вбудованою автоматизацією та Web-технологіями є перспективним науково-технічним завданням, розв'язання якого дозволить підвищити ефективність, безпеку, гнучкість та економічність процесів проєктування, будівництва й експлуатації трубопровідних систем, одночасно спрощуючи доступ до цих можливостей для менш підготовлених користувачів.

Метою роботи є створення інтелектуальних трубопроводів з вбудованими системами автоматизації та Web-технологіями для транспортування нафти та нафтопродуктів.

Викладення основного матеріалу

Транспортування нафти є важливим етапом у ланцюжку постачання енергоресурсів, забезпечуючи безперебійну доставку сировини нафти від місць видобутку до нафтопереробних заводів. Серед різних способів транспортування трубопроводу вважаються найбільш економічно вигідним та екологічно чистим варіантом для перекачування великих обсягів нафти на значні відстані. Проте ефективне керування роботою трубопроводів є складним завданням, яке вимагає постійного моніторингу та регулювання численних параметрів, таких як тиск, витрати, температура та інші показники.

У цьому контексті автоматизація керування трубопроводами для транспортування нафти відіграє вирішальну роль у забезпеченні безперервності та ефективності операцій транспортування. Завдяки впровадженню автоматизованих систем керування можна досягти кількох значних переваг. По-перше, безперервний моніторинг та регулювання потоку нафти дозволяє

оптимізувати використання трубопровідної системи, запобігаючи перервам у процесі експлуатації та аваріям при використанні. Крім того, автоматизовані системи можуть швидко виявляти відхилення від заданих параметрів та вживати необхідних заходів для запобігання аваріям чи витокам нафти, що є важливим, з точки зору безпеки експлуатації.

Ще одним важливим аспектом автоматизації є оптимізація ресурсів та зменшення експлуатаційних витрат. Автоматизовані системи дозволяють ефективно регулювати роботу насосних станцій та іншого обладнання для економії енергії, а також зменшують потребу в обслуговуючому персоналі на віддалених ділянках трубопроводу завдяки централізованому моніторингу та керуванню. Крім того, автоматизовані системи забезпечують високу точність вимірювання обсягів та параметрів транспортування нафти, допомагаючи уникнути втрат і розбіжностей в обліку вуглеводнів.

Нарешті, автоматизовані системи керування трубопроводами можуть легко інтегруватися з іншими системами, такими як системи видобутку, переробки та розподілу нафти, забезпечуючи безперервний потік даних та координацію роботи всього виробничого ланцюга.

У сучасних умовах цифрової трансформації галузі нафтогазової промисловості впровадження Web-технологій для обміну даними в системах керування трубопроводами для транспортування нафти набуває все більшого значення. Ці технології відкривають низку переваг, що сприяють підвищенню ефективності, масштабованості та гнучкості таких систем.

Необхідність ретельного стеження за тисками, витратами та іншими параметрами під час транспортування нафти трубопроводами ґрунтується на низці факторів, пов'язаних із забезпеченням безпеки, ефективності та сталості операцій.

По-перше, контроль тиску є важливим для запобігання розривам та витокам

нафти з трубопроводу. Надмірний тиск може призвести до перевищення межі міцності матеріалу труби, що може спричинити розгерметизацію та масштабне забруднення навколишнього середовища. Навпаки, недостатній тиск може призвести до порушення безперервності потоку та скупчення нафти в певних ділянках трубопроводу, що створює додаткові ризики. Тому стеження за тисками та підтримання їх у безпечних межах є обов'язковим для безаварійної експлуатації трубопроводів.

Крім того, моніторинг витрат нафти дозволяє виявляти та локалізувати потенційні витоки, а також забезпечувати точний облік транспортованих обсягів. Це має важливе значення для збереження матеріальних ресурсів, попередження економічних втрат і дотримання екологічних норм. Невідповідності між очікуваними та фактичними витратами можуть вказувати на проблеми в системі, що потребують негайного реагування.

Слід також ретельно відстежувати температуру нафти під час транспортування. Зміни температури можуть впливати на в'язкість нафти, що, в свою чергу, впливає на гідравлічний опір та енергоспоживання під час перекачування. Крім того, різкі зміни температури можуть призвести до термічного розширення або стиснення матеріалу труби, що створює додаткові напруження та ризики пошкодження.

Нарешті, слід зазначити, що точне вимірювання інших параметрів, таких як склад нафти, вміст домішок та корозійна активність, має важливе значення для забезпечення цілісності трубопроводу та попередження передчасного зношування обладнання. Наприклад, присутність агресивних речовин, таких як сірководень, може прискорити корозію труб, що може призвести до їх руйнування.

Ретельний моніторинг тисків, витрат, температури та інших параметрів під час транспортування нафти трубопроводами вимагає вдосконалення автоматизованих систем управління з кількох важливих причин:

1. Зростання обсягів даних та складності моніторингу. Сучасні трубопровідні системи обладнані великою кількістю різноманітних сенсорів та вимірювальних пристроїв, які генерують величезні потоки даних. Ефективна обробка та аналіз такої кількості інформації в режимі реального часу потребують потужних обчислювальних ресурсів та вдосконалених алгоритмів обробки даних, що забезпечується автоматизованими системами;

2. Підвищення вимог до точності та надійності вимірювань. Зі зростанням масштабів транспортування нафти та збільшенням відстаней трубопроводів зростають і вимоги до точності вимірювання параметрів, таких як тиск, витрати та склад нафти. Автоматизовані системи управління дозволяють інтегрувати передові технології вимірювань, калібрування сенсорів та алгоритми корекції даних для забезпечення необхідної точності;

3. Необхідність своєчасного виявлення відхилень та прогнозування аномалій. Своєчасне виявлення навіть незначних відхилень від заданих параметрів є основою для запобігання аваріям та витокам. Автоматизовані системи управління застосовують методи машинного навчання, штучного інтелекту та складні алгоритми аналізу даних для виявлення аномалій та прогнозування потенційних проблем на ранніх стадіях;

4. Забезпечення ефективної інтеграції та обміну даними. Сучасні трубопровідні системи є складними розподіленими системами, що включають різноманітне обладнання, програмне забезпечення та системи зв'язку. Автоматизовані системи управління забезпечують ефективну інтеграцію та обмін даними між різними компонентами, що дозволяє отримувати повну картину роботи системи в режимі реального часу;

5. Оптимізація процесів прийняття рішень та відгуку на інциденти. Завдяки вдосконаленим можливостям обробки даних та аналітики автоматизовані системи управління можуть надавати рекомендації щодо оптимальних дій у різних ситуаціях,

а також забезпечувати автоматизовану реакцію на інциденти, наприклад, шляхом перекриття секцій трубопроводу, регулювання тиску чи витрат тощо.

Тому вдосконалення автоматизованих систем управління є критично важливим для забезпечення ретельного моніторингу всіх параметрів транспортування нафти, своєчасного виявлення відхилень, прогнозування потенційних ризиків та оптимізації процесів прийняття рішень, що в кінцевому підсумку сприяє підвищенню безпеки, ефективності та екологічної стійкості операцій з транспортування нафти трубопроводами.

Однією з переваг впровадження автоматизованих систем керування трубопроводами для транспортування нафти є здатність своєчасно виявляти відхилення від заданих параметрів та оперативно вживати необхідні заходи для запобігання аваріям чи витокам нафти. Ця функціональність ґрунтується на безперервному моніторингу та аналізі великих обсягів даних, що надходять від різноманітних сенсорів і вимірювальних пристроїв, розподілених по всій довжині трубопроводу.

Автоматизовані системи здатні відстежувати та обробляти інформацію про тиск, витрати, температуру, склад нафти, корозійну активність та інші технологічні параметри в режимі реального часу. Завдяки використанню алгоритмів машинного навчання та передових методів обробки даних система може виявляти навіть незначні відхилення від нормальних режимів роботи, які можуть вказувати на потенційні проблеми чи загрози.

У разі виявлення таких відхилень автоматизована система може негайно вжити низку заходів для запобігання можливим наслідкам. Залежно від характеру ситуації це може включати регулювання тиску чи витрат, перекриття відповідних секцій трубопроводу, активацію резервних систем, аварійне відключення насосних станцій тощо. Такі дії дозволяють локалізувати проблему на ранній стадії та мінімізувати ризики масштабних аварій чи витоків нафти.

Крім того, автоматизовані системи можуть генерувати детальні звіти про інциденти, що включають інформацію про місце, час, параметри відхилення та вжиті заходи. Ця інформація є надзвичайно цінною для подальшого аналізу причин інциденту, вдосконалення процедур реагування та запобігання повторенню подібних ситуацій у майбутньому.

Звичайні автоматизовані системи керування трубопроводами зазвичай працюють лише в межах однієї локальної мережі або місця розташування. Це означає, що для контролю та моніторингу системи ви маєте фізично перебувати поруч з нею.

Натомість системи, які використовують Web-технології, дозволяють керувати трубопроводом віддалено через інтернет. Ви можете заходити у Web-інтерфейс системи з будь-якого місця за допомогою комп'ютера, смартфона чи планшета та відстежувати всі показники транспортування нафти онлайн.

Крім того, Web-технології роблять системи більш гнучкими та масштабованими. Додавати нові функції чи збільшувати потужності стає значно простіше. Також такі системи краще інтегруються з іншими програмами та обладнанням завдяки стандартним інтернет-протоколам.

Web-інтерфейс, зазвичай, зручний та інтуїтивний, з багатьма візуалізаціями даних у вигляді графіків, діаграм тощо. Це полегшує аналіз інформації та прийняття рішень.

Окрім того, Web-технології забезпечують належний рівень безпеки та захисту даних від несанкціонованого доступу завдяки шифруванню, аутентифікації користувачів та іншим засобам.

Однією з основною переваг використання Web-технологій є забезпечення централізованого доступу до даних та управління системою з будь-якої точки світу. Завдяки стандартизованим протоколам та інтерфейсам, таким як HTTP, REST API та WebSocket,

користувачі можуть отримувати доступ до актуальної інформації про стан трубопроводу та здійснювати необхідні керуючі дії з будь-якого пристрою, підключеного до Інтернету. Це значно спрощує процес моніторингу та керування розгалуженими трубопровідними системами, які можуть простягатися на сотні кілометрів.

Крім того, Web-технології забезпечують масштабованість та гнучкість систем керування трубопроводами. Використання сучасних Web-фреймворків та мікросервісної архітектури дозволяє легко розширювати функціональність системи та інтегрувати нові компоненти без значних зусиль. Це особливо важливо в умовах постійного зростання обсягів даних та вимог до обробки інформації в реальному часі.

Ще однією перевагою є можливість легкої інтеграції з іншими системами та платформами через стандартизовані Web-інтерфейси. Це дозволяє системам керування трубопроводами ефективно обмінюватися даними з системами видобутку нафти, нафтопереробними заводами, системами управління запасами та іншими складовими єдиного ланцюжка постачання нафтопродуктів.

Важливо також відзначити, що Web-технології забезпечують кросплатформеність, що дозволяє розгортати системи керування трубопроводами на різних операційних системах та апаратних платформах. Це спрощує процес впровадження та обслуговування таких систем, зменшуючи витрати на інфраструктуру.

Нарешті, Web-технології пропонують потужні механізми забезпечення безпеки передачі даних, такі як шифрування, автентифікація та авторизація користувачів. Це є критично важливим для систем керування трубопроводами, де необхідно захистити конфіденційну інформацію та запобігти несанкціонованому доступу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Аналіз актуальних наукових робіт, присвячених автоматичному керуванню трубопроводами, виявляє різноманітні підходи та методології, спрямовані на оптимізацію та покращення ефективності таких систем. Значна частина досліджень зосереджена на впровадженні методів машинного навчання, які використовуються для оптимізації потоку речовин та зниження енергоспоживання. Наприклад, у роботі Хуанга та ін. (2021) запропоновано підхід на основі глибокого навчання для регулювання роботи насосних станцій, що дозволяє мінімізувати втрати тиску та енергоспоживання, навчаючись на історичних даних для прогнозування оптимальних керуючих дій [1].

Інше важливе дослідження, проведене Венкатешем та ін. (2019), представляє систему керування в реальному часі для моніторингу та запобігання пошкоджень трубопроводів. Використовуючи Web-інтерфейс та методи машинного навчання, система забезпечує безперервний моніторинг стану трубопроводів, виявлення аномалій та прогнозування ризиків пошкоджень, автоматично застосовуючи відповідні керуючі дії [2].

Генетичні алгоритми також знаходять своє застосування у сфері оптимізації трубопроводних систем. Аль-Ібрагімі та ін. (2018) використовували цей підхід для пошуку оптимальних режимів керування тисками та витратами, враховуючи енергоспоживання та втрати тиску [3]. Дослідження Пуреллі та ін. (2017) зосереджено на проблемі виявлення та локалізації витоків у трубопроводах, де запропоновано метод оптимального керування, який мінімізує втрати речовини шляхом перекриття ділянок труб та перенаправлення потоків [4].

Комплексний підхід до керування трубопроводними мережами запропоновано в роботі Ченга та ін. (2021), де описується розробка інтелектуальної системи керування з використанням агентів та семантичних Web-технологій.

Така система забезпечує інтелектуальний моніторинг, діагностику та прийняття рішень для управління складними трубопроводними мережами [5].

Загалом, сучасні дослідження в цій галузі акцентують увагу на використанні методів машинного навчання, оптимізаційних алгоритмів та інтелектуальних систем для автоматичного керування трубопроводами. Основними цілями цих досліджень є зменшення енергоспоживання, мінімізація втрат тиску, виявлення та попередження пошкоджень, а також оптимізація потоків речовини. Впровадження Web-технологій забезпечує зручний доступ до систем керування, сприяючи ефективному моніторингу та управлінню трубопроводними мережами [6].

Теоретична база роботи

Розглянемо детальніше математичну модель, що описує динаміку та процеси керування нафтопроводним трубопроводним комплексом з використанням Web-технологій.

Об'єкт керування складається з N послідовних секцій труб $S_1, S_2, \dots, S_N$ та M насосних станцій $PS_1, PS_2, \dots, PS_M$, розташованих між секціями. Кожна секція труби S_i оснащена наступними сенсорами:

- Комплектом з J_i первинних перетворювачів тиску P_{ij} , $j=1, \dots, J_i$;
- Комплектом з K_i первинних перетворювачів витрати Q_{ik} , $k=1, \dots, K_i$;
- Комплектом з L_i первинних перетворювачів температури T_{il} , $l=1, \dots, L_i$;
- Комплектом з M_i сенсорів цілісності C_{im} , $m=1, \dots, M_i$;
- Комплектом з N_i сенсорів положення у просторі R_{in} , $n=1, \dots, N_i$.

Стан i -ї секції труби S_i в момент часу t можна описати вектором:

$$x_i(t) = [p_{i1}(t), \dots, p_{iJ_i}(t), q_{i1}(t), \dots, q_{iK_i}(t), T_{i1}(t), \dots, T_{iL_i}(t), C_{i1}(t), \dots, C_{iM_i}(t), R_{i1}(t), \dots, R_{iN_i}(t)]^T. \quad (1)$$

Загальний стан трубопроводу $X(t)$ є об'єднанням станів усіх секцій:

$$X(t) = [x_1(t)^T, x_2(t)^T, \dots, x_N(t)^T]^T. \quad (2)$$

Керування здійснюється шляхом регулювання роботи насосних станцій PS_m , які впливають на тиск, витрату та температуру в трубопроводі. Вектор керуючих впливів $u_m(t)$ для станції PS_m може включати: частоту обертання насосів, ступінь відкриття/закриття клапанів, потужність підігрівачів тощо.

Зведений вектор керувань:

$$U(t) = [u_1(t)^T, u_2(t)^T, \dots, u_m(t)^T]^T.$$

Динаміка системи описується диференціальними рівняннями:

$$dp_i/dt = f_p(\rho_i, p_i, q_i, T_i, u_i, u_{i+1}), \quad (3)$$

$$dp_i/dt = f_p(\rho_i, p_i, q_i, T_i, u_i, u_{i+1}), \quad (4)$$

$$dq_i/dt = f_q(\rho_i, p_i, q_i, T_i, u_i, u_{i+1}), \quad (5)$$

$$dT_i/dt = f_T(\rho_i, p_i, q_i, T_i, u_i, u_{i+1}), \quad (6)$$

де ρ_i – густина нафти/нафтопродукту в секції S_i , f_p , f_q , f_T – нелінійні функції, що моделюють процеси переносу маси, імпульсу та енергії в трубопроводі з урахуванням законів гідродинаміки, термодинаміки, теплопередачі тощо.

Об'єднуючи всі рівняння в одну систему, отримаємо:

$$dX/dt = F(X, U), \quad (7)$$

де F – векторна функція, що включає рівняння для всіх секцій труб.

Метою керування є знаходження оптимального керування $U(t)$, що мінімізує деяку цільову функцію та задовольняє обмеженням:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} L(X(t), U(t), t) dt \rightarrow \min, \\ X_{\min} \leq X(t) \leq X_{\max}, \\ U_{\min} \leq U(t) \leq U_{\max}, \quad (8)$$

де L – функція штрафу, що враховує критерії якості керування: енергоспоживання, відхилення тиску/витрати від заданих значень, витрати нафти/нафтопродукту через пошкодження тощо.

Для розв'язання задачі оптимального керування можуть використовуватись різні методи, наприклад, принцип максимуму Понтрягіна, динамічне програмування, метод послідовних квадратичних програм, а також підходи на основі машинного навчання.

Розв'язок $X(t)$, $U(t)$ надходить на контролери насосних станцій PS_m для реалізації керуючих впливів $u_m(t)$. Система періодично коригується на основі

актуальних даних з сенсорів для підвищення точності моделі та якості керування.

Використання Web-технологій дозволяє візуалізувати стан трубопроводу, тренди зміни параметрів, налаштовувати цілі керування та обмеження через зручний Web-інтерфейс, доступний з будь-якої точки. Це забезпечує ефективний централізований моніторинг та керування нафтогазопровідним комплексом [7].

Наведена математична модель є спрощеною та ілюструє основні підходи до формалізації процесів у трубопроводі та синтезу оптимальних керувань. У реальних системах можуть бути використані більш складні моделі з урахуванням специфічних особливостей об'єкта керування.

Структура системи автоматичного керування нафтогазопровідним комплексом складається з таких основних компонентів:

1. Об'єкт керування – комплекс з N секцій труб $S_1, S_2, \dots, S_N$ та M насосних станцій $PS_1, PS_2, \dots, PS_M$, обладнаних відповідними первинними перетворювачами та сенсорами тиску, витрати, температури, цілісності стінок та положення;

2. Локальні контролери на кожній насосній станції, що збирають дані з сенсорів секцій труб та реалізують керуючі впливи на насоси, клапани, підігрівачі тощо;

3. Центральний сервер керування, який виконує наступні функції:

- Збирає дані від локальних контролерів через WEB-технології;
- Оновлює математичну модель об'єкта $X = F(X, U)$ на основі зібраних даних;
- Розв'язує задачу оптимального керування: знаходить $U^*(t)$, що мінімізує цільову функцію J з урахуванням обмежень;
- Відправляє отримані оптимальні керування $U^*(t)$ на локальні контролери.

4. Web-інтерфейс для візуалізації стану системи, трендів змін параметрів, задання цілей керування, обмежень тощо.

Алгоритм роботи системи:

1. Локальні контролери збирають дані з давачів секцій труб та надсилають їх на центральний сервер через Web-інтерфейс.

2. Центральний сервер оновлює математичну модель $X = F(X, U)$ на основі отриманих даних.

3. Розв'язується задача оптимального керування за допомогою чисельних методів, наприклад, за принципом максимуму Понтрягіна:

- формуються функції Гамільтона для кожної секції труби;
- розв'язується гранична задача для системи рівнянь стану та спряжених рівнянь;
- знаходиться оптимальне керування $U^*(t)$ з умови максимуму функції Гамільтона.

4. Отримані оптимальні керування $U^*(t)$ відправляються на локальні контролери через Web-інтерфейс;

5. Локальні контролери реалізують керуючі впливи на насоси, клапани тощо згідно з $U^*(t)$;

6. Цикл повторюється для наступного кроку керування.

Програмний код для Web-технології обміну даними може бути реалізований на базі клієнт-серверної архітектури з використанням таких технологій:

Серверна частина (Node.js):

```
const http = require('http');
const socketio = require('socket.io');

const server = http.createServer();
const io = socketio(server);

// Обробка підключення клієнтів
io.on('connection', socket => {
  console.log('Клієнт підключився');

  // Обробка даних від локальних контролерів
  socket.on('sensorData', data => {
    console.log('Отримано дані давачів:', data);
    // Оновлення моделі та розрахунок оптимального керування
    const optimalControl = calculateOptimalControl(data);
    // Відправка оптимального керування контролерам
```

```
socket.emit('controlSignal', optimalControl);
  });
});

server.listen(3000, () =>
  console.log('Сервер запущено на http://localhost:3000'));
```

Клієнтська частина (браузер):

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <title>Система керування нафтогазопроводом</title>
</head>
<body>
  <h1>Стан системи</h1>
  <div id="systemStatus"></div>

  <script
src="/socket.io/socket.io.js"></script>
  <script>
    const socket = io();

    // Надсилання даних давачів на сервер
    setInterval(() => {
      const sensorData = getSensorData(); // Функція для збору даних давачів
      socket.emit('sensorData', sensorData);
    }, 1000); // Кожну секунду

    // Отримання оптимального керування від сервера
    socket.on('controlSignal', controlData => {
      console.log('Отримано оптимальне керування:', controlData);
      // Реалізація керуючих впливів на обладнання
      implementControl(controlData);
      // Оновлення відображення стану системи
      updateSystemStatus(controlData);
    });

    function getSensorData() {
      // Код для збору даних з давачів
      return { /* Дані давачів */ };
    }

    function implementControl(controlData) {
      // Код для реалізації керуючих впливів
    }
  </script>
</body>
</html>
```

```
function
updateSystemStatus(controlData) {
    const statusDiv =
document.getElementById('systemStatus');
    statusDiv.innerHTML =
JSON.stringify(controlData, null, 2);
}
</script>
</body>
</html>
```

У цьому прикладі використовується Socket.IO – бібліотека для організації двостороннього обміну даними між сервером Node.js та клієнтами в браузері [8]. Серверна частина отримує дані давачів, сенсорів та первинних перетворювачів від локальних контролерів, оновлює модель та розраховує оптимальне керування, яке потім відправляється назад на клієнтів для реалізації керуючих впливів та візуалізації стану системи.

Експериментальне дослідження

При експериментальному дослідженні була створена та проаналізована система автоматизації з Web-технологією обміну даними для трубопроводу довжиною 100 метрів, розташованого на похилій місцевості з перепадом висот у 20 метрів. Дослідження мало на меті перевірити ефективність системи контролю та моніторингу, яка використовує Web-технології обміну даними для трубопроводу, обладнаного первинними перетворювачами тиску і витрати та GPS-системою.

Для проведення експерименту було обрано похилу місцевість, яка мала необхідний підйом у 20 метрів. На цій ділянці було змонтовано трубопровід довжиною 100 метрів. Трубопровід було виготовлено з поліетиленових труб діаметром 25,4 мм, що забезпечують достатню пропускну здатність і стійкість до внутрішнього тиску та механічних навантажень. Для забезпечення надійного збору даних про тиск, витрату та просторові координати трубопроводу було використано сучасні технічні засоби автоматизації. Монтаж проводився із забезпеченням необхідних технічних вимог для уникнення можливих витоків та деформацій трубопроводу.

Для забезпечення точного моніторингу параметрів трубопроводу вздовж його довжини були встановлені первинні перетворювачі тиску і витрати, а також GPS-передачі. Сенсори та первинні вимірювальні перетворювачі були розміщені через кожні 10 метрів, що дозволило отримувати детальні дані про стан трубопроводу на кожному відрізку. Первинні перетворювачі тиску забезпечували вимірювання тиску води в трубопроводі, тоді як давачі витрати реєстрували обсяг перекачуваної води. Для забезпечення потоку води у трубопроводі були використані насоси з напірною характеристикою 5 метрів. Насоси розташовувалися у відповідних точках, що були визначені за допомогою внутрішнього алгоритму програми керування трубопроводом, що дозволяло ефективно перекачувати воду на висоту 20 метрів.

Для опису динаміки потоку рідини в трубопроводі використовуємо рівняння Бернуллі з урахуванням втрат напору:

$$H_1 + (v_1^2/2g) + (p_1/\rho g) = H_2 + (v_2^2/2g) + (p_2/\rho g) + h_L, \quad (9)$$

де H_1 , H_2 – геометрична висота в точках 1 і 2, v_1 , v_2 – швидкість потоку, p_1 , p_2 – тиск, ρ – густина рідини, g – прискорення вільного падіння, h_L – втрати напору.

Втрати напору розраховуються за формулою Дарсі-Вейсбаха: m^3

$$h_L = f \cdot (L/D) \cdot (v^2/2g), \quad (10)$$

де f – коефіцієнт тертя, L – довжина трубопроводу, D – діаметр труби.

Запропоновано програмний код для реалізації експерименту зі збору даних про тиск, витрату та просторові координати трубопроводу, розташованого на похилій місцевості. Програмний код включає серверну частину на базі Node.js та клієнтську частину на базі HTML, CSS та JavaScript.

Серверна частина слугує для налаштування сервера, який відповідає за з'єднання з клієнтами та отримання і обміну даними від сенсорів та первинних вимірювальних перетворювачів. Сервер реалізовано на Node.js з використанням бібліотек Express та Socket.io.

Серверна частина експериментального дослідження:

```
// server.js
const express = require('express');
const http = require('http');
const socketIo = require('socket.io');
const fetch = require('node-fetch');

const app = express();
const server = http.createServer(app);
const io = socketIo(server);

app.use(express.static('public'));

app.get('/', (req, res) => {
  res.sendFile(__dirname +
    '/public/index.html');
});

const API_KEY = 'YOUR_GOOGLE_API_KEY';
// Ваш API ключ Google
const sensors = [
  { id: 1, lat: 48.9226, lng: 24.7111,
    pressure: 0, flow: 0, elevation: 0 },
  { id: 2, lat: 48.9230, lng: 24.7120,
    pressure: 0, flow: 0, elevation: 0 },
  { id: 3, lat: 48.9235, lng: 24.7125,
    pressure: 0, flow: 0, elevation: 0 },
  { id: 4, lat: 48.9240, lng: 24.7130,
    pressure: 0, flow: 0, elevation: 0 },
  { id: 5, lat: 48.9245, lng: 24.7135,
    pressure: 0, flow: 0, elevation: 0 },
];

// Функція для отримання висоти для
// заданих координат
async function getElevation(lat, lng) {
  const response = await
  fetch(`https://maps.googleapis.com/maps/
  api/elevation/json?locations=${lat},
  ${lng}&key=${API_KEY}`);
  const data = await response.json();
  return data.results[0].elevation;
}

async function initializeElevations() {
  for (const sensor of sensors) {
    sensor.elevation = await
    getElevation(sensor.lat, sensor.lng);
  }
}

initializeElevations().then(() => {
  io.on('connection', (socket) => {
    console.log('Клієнт підключився');
```

```
// Отримання даних з контролерів
// через HTTP-запити
async function fetchSensorData() {
  try {
    const response = await
    fetch('URL_TO_YOUR_CONTROLLER_DATA_API');
    // Замість цього URL використовуйте
    // фактичний URL вашого API
    const data = await
    response.json();

    sensors.forEach(sensor => {
      const sensorData =
      data.find(d => d.id === sensor.id);
      if (sensorData) {
        sensor.pressure =
        sensorData.pressure;
        sensor.flow = sensorData.flow;
      }
    });

    socket.emit('sensorData',
    sensors);
  } catch (error) {
    console.error('Помилка отримання
    даних з контролерів:', error);
  }
}

// Імітація отримання даних від
// давачів кожну секунду
setInterval(fetchSensorData, 1000);

server.listen(3000, () => {
  console.log('Сервер запущено на порту
  3000');
});
});
```

За візуалізацію отриманих даних у вигляді точок на карті, де розташовується трубопровід та відображення координат, відповідав створений клієнтський інтерфейс. Клієнтська частина його реалізована з використанням HTML, CSS та JavaScript, а також бібліотеки Chart.js для побудови графіків:

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <title>Моніторинг трубопроводу</title>
  <script
  src="/socket.io/socket.io.js"></script>
  <script
  src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js
  "></script>
```

```

<script
src="https://maps.googleapis.com/maps/api/
js?key=YOUR_GOOGLE_API_KEY"></script>
<style>
  #map {
    height: 400px;
    width: 100%;
  }
</style>
</head>
<body>
<h1>Дані моніторингу трубопроводу </h1>
<canvas id="pressureChart" width="400"
height="200"></canvas>
  <canvas id="flowChart" width="400"
height="200"></canvas>
  <div id="coordinates"></div>
  <div id="map"></div>

  <script>
    const socket = io();

    // Ініціалізація графіків
    const pressureChart = new
Chart(document.getElementById('pressureCha
rt').getContext('2d'), {
      type: 'line',
      data: {
        labels: [],
        datasets: [{
          label: 'Тиск',
          data: [],
          borderColor: 'rgb(75, 192,
192)',
          tension: 0.1
        }]
      }
    });

    const flowChart = new
Chart(document.getElementById('flowChart')
.getContext('2d'), {
      type: 'line',
      data: {
        labels: [],
        datasets: [{
          label: 'Витрата',
          data: [],
          borderColor: 'rgb(255, 99, 132)',
          tension: 0.1
        }]
      }
    });

    let map;
    let markers = [];
    function initMap() {
      map = new
google.maps.Map(document.getElementById
('map'), {

```

```

      center: { lat: 48.9226, lng:
24.7111 }, // Центр біля Івано-Франківська
      zoom: 15
    });

    socket.on('sensorData', (data) => {
      const time = new
Date().toLocaleTimeString();
      pressureChart.data.labels.push(time);
      flowChart.data.labels.push(time);
      data.forEach((sensor, index) => {

        pressureChart.data.datasets[0].data.push
(sensor.pressure);
        flowChart.data.datasets[0].data.push
(sensor.flow);
        if (markers[index]) {
          markers[index].setPosition({ lat:
sensor.lat, lng: sensor.lng });

          markers[index].setTitle(`Pressure:
${sensor.pressure.toFixed(2)}, Flow:
${sensor.flow.toFixed(2)}, Elevation:
${sensor.elevation.toFixed(2)}`);
        } else {
          markers[index] = new
google.maps.Marker({
            position: { lat: sensor.lat,
lng: sensor.lng },
            map: map,
            title: `Pressure:
${sensor.pressure.toFixed(2)}, Flow:
${sensor.flow.toFixed(2)}, Elevation:
${sensor.elevation.toFixed(2)}`
          });
        }
      });

      if
(pressureChart.data.labels.length > 20) {
        pressureChart.data.labels.shift();
        pressureChart.data.datasets[0].data.shift
();
        flowChart.data.labels.shift();
        flowChart.data.datasets[0].data.shift();
      }
      pressureChart.update();
      flowChart.update();

      document.getElementById('coordinates').
innerHTML = `Координати: ${data.map
(sensor => `(${sensor.lat.toFixed(6)},
${sensor.lng.toFixed(6)}, Elevation:
${sensor.elevation.toFixed(2)})`}.
join(' | ')}`;
    });
  }
  window.onload = initMap;
</script>
</body>
</html>

```

Під час експериментальних досліджень було розроблено та впроваджено систему для моніторингу параметрів трубопроводу, розташованого на похилій місцевості. Нижче наведено кроки, які були здійснені для налаштування серверної та клієнтської частин системи.

Серверна частина:

1. Код серверної частини було збережено у файлі `server.js`.
2. Виконано команду `npm init -y` для ініціалізації проєкту.
3. Для встановлення необхідних пакетів було використано команду `npm install express socket.io node-fetch`.
4. Замінено `YOUR_GOOGLE_API_KEY` на актуальний API ключ Google.
5. Замінено `URL_TO_YOUR_CONTROLLER_DATA_API` на фактичний URL API для отримання даних з контролерів.
6. Сервер запущено за допомогою команди `node server.js`.

Клієнтська частина:

1. Створено папку `public`.
2. Код клієнтської частини збережено у файлі `public/index.html`.
3. Замінено `YOUR_GOOGLE_API_KEY` у URL завантаження Google Maps на актуальний API ключ.

Запуск системи:

1. Відкрито браузер та перейдено за адресою `http://localhost:3000`, щоб побачити результати роботи системи моніторингу з реальними даними з контролерів.

У проведеному експериментальному дослідженні як базове механічне обладнання було використано насосне устаткування Pedrollo PKm60, що характеризується стабільною робочою напірною характеристикою до 5-10 м, чим забезпечено можливість ефективного транспортування рідини на похилій ділянці довжиною 100 м із перепадом висот у 20 м. Матеріал трубопроводу представлений поліетиленовими трубами діаметром

25,4 мм, стійкими до внутрішнього гідравлічного тиску та механічних деформацій, що дозволило забезпечити герметичність і стабільність гідравлічного режиму під час досліду (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики трубопроводу

№ насоса	Загальна висота підйому (м)	Робочий напір насоса (м)	Тиск на виході з насоса (бар)	Витрата (м³/год)
1	0–5	5	0.5	2,01
2	5–10	5	1.04	2,01
3	10–15	5	1.51	2,01
4	15–20	5	2.02	2,02

Просторове положення об'єкта контролю фіксувалося за допомогою супутникового модуля u-blox NEO-6M, який забезпечує достатню точність геопозиціонування для локального моніторингу положення трубопроводу.



Рисунок 1 – Результат роботи системи автоматизації з Web-технологією

Система автоматизації побудована на основі контролера Raspberry Pi 4, який виконував функції центрального модуля збору та обробки інформації, інтегруючись із первинними перетворювачами. Для вимірювання тиску застосовано датчики серії WIKA A-10, які забезпечують аналоговий вихід 4–20 мА та мають точність до $\pm 0.25\%$ FS, що дозволило з

високою достовірністю реєструвати гідростатичні характеристики рідини у трубопроводі. Моніторинг витрати реалізовано за допомогою електромагнітного витратоміра Siemens SITRANS F M MAG 5100W, оптимізованого для роботи з водопровідною водою в умовах експериментального стенду. Збір, передача та візуалізація даних здійснювались через серверне середовище Node.js з використанням бібліотеки Socket.IO для двостороннього обміну в реальному часі, а також з інтеграцією Google Maps API і Chart.js для просторової візуалізації та графічного представлення вимірюваних параметрів у веб-інтерфейсі клієнтської частини.

Висновки

Впровадження інтелектуальних трубопровідних систем із вбудованою автоматизацією та Web-технологіями є перспективним рішенням для підвищення ефективності, безпеки та економічності процесів транспортування нафти й нафтопродуктів у сучасних реаліях цифрової трансформації галузі. Запропонований підхід дозволяє подолати численні недоліки традиційних методів, спростивши процес проектування, візуалізації та моніторингу трубопровідних систем, а також забезпечуючи оптимальні режими роботи, економію ресурсів та можливість транспортування різних речовин без необхідності резервуарних парків.

Важливим аспектом розробленого рішення є автоматизація керування трубопровідним комплексом за допомогою сучасних методів теорії оптимального керування, машинного навчання та Web-технологій. Застосування математичних моделей та чисельних методів, таких як принцип максимуму Понтрягіна, динамічне програмування та підходи на основі штучного інтелекту, дозволяє знаходити оптимальні керуючі впливи на насосні станції, клапани та інше обладнання з метою мінімізації енергоспоживання, відхилень від заданих параметрів тиску, витрати, температури, а

також зменшення втрат продукту через негерметичність чи пошкодження труб.

Інтеграція Web-технологій у системи керування трубопроводами відіграє важливу роль у забезпеченні централізованого доступу, масштабованості та гнучкості. Використання стандартизованих протоколів та інтерфейсів, таких як HTTP, REST API та WebSocket, дозволяє користувачам отримувати доступ до актуальної інформації про стан трубопроводу та здійснювати необхідні керуючі дії з будь-якого пристрою, підключеного до Інтернету. Це значно полегшує процес моніторингу та керування трубопровідними системами, які можуть простягатися на сотні кілометрів.

Використання експериментального методу дослідження підтвердило ефективність розробленої автоматизованої системи керування трубопроводом з використанням Web-технологій. Система забезпечила точну візуалізацію траси, постійний моніторинг технологічних параметрів, ефективне керування насосами та швидке виявлення потенційних проблем. Отримані результати демонструють перспективність застосування Web-технологій для автоматизації керування трубопровідними системами, особливо для об'єктів зі складною просторовою конфігурацією та змінним профілем висот.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Хуан, Цзяньвей, Чженьхуа Лю, Сяоя Чжу, Ченчжі Го, Кежі Лі та Денглонг Чжан. Оптиміальне керування потоком в трубопроводах з використанням технік машинного навчання. *Журнал чистого виробництва*. 2021. 289. 125801.
2. Джайдееп Венкатеш, Б. Суматі, М. Дейвіган, Дж. Дінеш та Р. К. Суреш. Система керування в реальному часі для моніторингу і запобігання пошкоджень трубопроводів. *IEEE Sensors Journal*. 2019. 19. No. 15. С. 6039-6047.
3. Хайдер Х. Аль-Ібрагімі, Рашид К. Абу Аль-Руб та С. Рао Сінгіресу. Оптимізація потоку в трубопроводах з використанням генетичних алгоритмів. *Прикладні науки* 8.2018. No. 6. С. 901.
4. Жозе Клаудіо Пуричеллі, Амаурі Джакоміні, Вілма Таварес да Роса та Александре Моселлін. Керування витоком в трубопроводах в режимі реального часу. *Журнал управління технологічними процесами*. 2017. 55. С.122-136.
5. Сюань Чен, Лян Цао, Хуей Ван, Да Хан та Джунвей Чжу. Інтелектуальна система керування для трубопровідних мереж. *Прикладні науки*. 2021. 11. No. 3. С. 1160.
6. Лі С., Чжан Ц., Ван Х. Система моніторингу в реальному часі для трубопроводів водорозподільної мережі на основі Інтернету речей (IoT). *Журнал гідроінформатики*. 2020. 22(3). С. 567–578.
7. Пата П.С., Трубін М.П., Терещенко О.С. Основні можливості та перспективи використання мов веб-програмування для розробки автоматизованих систем управління. V Міжнародна науково-практична конференція «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво». 20-22 жовтня 2021 року. м. Шостка. С. 232-235. URL: https://himtec.sumdu.edu.ua/doc/2021/Conference%20book%202021_232-235.pdf
8. Сирмам'їх, І. В. Розробка системи автоматизованого обліку досягнень студентів на Node.js з інтеграцією Firebase. Наука та виробництво: зб. наукових праць. ДВНЗ «ПДТУ». Маріуполь. 2020. Вип. 22. спецвип. С. 255–262. doi: [10.31498/2522-9990222020211387](https://doi.org/10.31498/2522-9990222020211387)

References

1. Huang Jianwei, Zhenhua Liu Xiaoxia Zhu, Chengzhi Guo, Kezhi Li, and Denglong Zhang. Optimal flow control in pipelines using machine learning techniques. *Journal of Cleaner Production*. 2021. 289. 125801.
2. Jaideep Venkatesh, B. Sumathi, M. Deiveegan, J. Dinesh, and R. K. Suresh. A Real-Time Monitoring and Damage Prevention System for Pipelines. *IEEE Sensors Journal*. 2019. 19. No. 15 P. 6039-6047.
3. Haider H. Al-Ibrahimi, Rashid K. Abu Al-Rub, and S. Rao Singiresu. Pipeline Flow Optimization Using Genetic Algorithms. *Applied Sciences* 8. 2018. No. 6. P. 901.
4. José Claudio Puricelli, Amauri Giacomini, Vilma Tavares da Rosa, and Alexandre Mocellin. Real-time leak control in pipelines. *Journal of Process Control*. 2017. 55. P. 122-136.
5. Xuan Cheng, Liang Cao, Hui Wang, Da Han, and Junwei Zhu. Intelligent Control System for Pipeline Networks. *Applied Sciences*. 2021. 11. No. 3. P.1160.
6. Li X., Zhang J., Wang H. Real-Time Monitoring System for Water Distribution Pipelines Based on IoT. *Journal of Hydroinformatics*. 2020. 22(3). P. 567–578.
7. Pata P.S., Trubin M.P., Tereshchenko O.S. "Key capabilities and prospects of using web programming languages for the development of automated control systems." V International Scientific and Practical Conference "Chemical Technology: Science, Economics and Production". October 20-22, 2021. Shostka. P. 232-235. URL: https://himtec.sumdu.edu.ua/doc/2021/Conference%20book%202021_232-235.pdf [in Ukrainian]
8. Syrmamykh, I.V. Development of an automated student achievement tracking system on Node.js with Firebase integration Science and Production: collection of scientific papers. PSTU. Mariupol. 2020. Issue 22. special issue. P. 255-262. doi: [10.31498/2522-9990222020211387](https://doi.org/10.31498/2522-9990222020211387) [in Ukrainian]

STUDY OF THE STRUCTURE OF THE SYSTEM OF AUTOMATED CONTROL OF THE OIL TRANSPORT PIPELINE USING WEB TECHNOLOGIES AND DATA EXCHANGE

Kuchmystenko O. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0457-7611>
e-mail: kafatp@ukr.net

Abstract. The object of the study in this work is an automated control system for oil transportation pipelines with integrated Web-technologies for data exchange. The purpose of the work is to create intelligent pipelines with built-in automation systems to ensure the optimization of oil and petroleum products transportation processes, and to increase the efficiency, safety and cost-effectiveness of pipeline systems operation. A review of modern approaches to automatic pipeline control using optimal control methods, machine learning, genetic algorithms and Web-interfaces is conducted. Current directions for the development of such systems in the context of the digital transformation of the oil and gas industry are identified. A mathematical model is proposed that describes the dynamics of the pipeline system taking into account hydrodynamic and thermal parameters, as well as sensor data on pressure, flow, temperature and geospatial position. The control system is implemented through local controllers of pumping stations and a central server with a Web-interface, which provides the calculation of optimal control actions using the Pontryagin maximum principle, dynamic programming or machine learning algorithms. An experimental implementation of a control system on a pipeline located on a sloping terrain using Web technologies in a client-server architecture based on Node.js and Socket.IO has been carried out. The results of visualization and monitoring of data on interactive Google Maps in real time are presented. The effectiveness of the proposed approach has been assessed, confirming the possibility of its practical application for controlling oil transportation systems of complex configuration.

Keywords: intelligent pipelines, automated control systems, Web technologies, oil transportation, pumping optimization, mathematical modeling, machine learning.