

## **УДОСКОНАЛЕННЯ АСК ЗА ВИТОКАМИ І НЕСАНКЦІОНОВАНИМИ ВІДБОРАМИ НАФТИ З МН, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

*О.В. Кучмистенко, М.В. Шавранський*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067,  
e-mail: kafatp@ukr.net*

*Робота присвячена дослідженню актуальної науково-практичної задачі, яка полягає у аналізі існуючих способів і методів виявлення витоків й несанкціонованих відборів нафти з магістрального нафтопроводу та встановленню шляхів подальшого удосконалення АСК. Досліджено і проаналізовано методи і способи сучасних систем виявлення витоків, проведена оцінка ефективності автоматизованих систем виявлення несанкціонованих витоків і відборів нафти з магістральних нафтопроводів на основі інтелектуальних технологій, у том числі побудованих на основі методів нечіткої логіки за вісьмома ознаками.*

*Ключові слова: магістральний нафтопровід, система автоматичного контролю, алгоритм керування, нечітка логіка.*

*Работа посвящена исследованию актуальной научно-практической задачи, которая заключается в анализе существующих способов и методов выявления истоков и несанкционированных отборов нефти из магистрального нефтепровода, и установлению путей дальнейшего усовершенствования АСК. Исследованы и проанализированы методы и способы современных систем выявления утечек, проведена оценка эффективности автоматизированных систем выявления несанкционированных утечек и отборов нефти из магистральных нефтепроводов на основе интеллектуальных технологий, в том числе базирующихся на методах нечеткой логики по восьми признакам.*

*Ключевые слова: магистральный нефтепровод, система автоматического контроля, алгоритм управления, нечеткая логика.*

*The article is devoted to the study of the scientific and practical problem, which consists in analysis of the existing ways and methods for detection of leaks and unauthorized withdrawal of oil from the main pipeline and establishment of the ways for further ACS improvement. It also studies and analyzes the methods and techniques of modern leak detection systems, as well as makes an assessment of the effectiveness of automated systems for detection of leaks and unauthorized withdrawal of oil from main pipelines based on intelligent technologies including the ones that were built on the basis of the fuzzy logic methods in accordance with eight characteristics.*

*Keywords: main pipeline, automatic control system, control algorithm, fuzzy logic.*

**Вступ.** На основі теоретичних досліджень створено безліч методів і систем виявлення витоків від звичайного огляду трубопроводу лінійними обхідниками с використанням течошукачів до застосування дорогих волоконнооптичних кабелів-давачів і супутникових систем стеження. Нині, не зважаючи на різноманіття вживаних способів і методик, не існує універсального методу, здатного досить точно визначити місце розташування витoku без значних витрат на реалізацію і експлуатацію. Кожен з існуючих методів не позбавлений недоліків. Також не можна залишати поза увагою той факт, що технологічне оснащення врізувальників постійно удосконалюється. Тому на сьогодні дослідження в області виявлення витікання нафтопродукту з магістральних трубопроводів залишається актуальним.

**Постановка завдання:** дослідження та аналіз застосування методів математичного моделювання на основі методів нечіткої логіки в сучасних автоматизованих системах виявлення витоків нафти з магістральних нафтопроводів.

**Метою даної роботи є** підвищення надійності нафтопроводів шляхом удосконалення АСК за витками і несанкціонованими відбо-

рами нафти з МН побудованих на основі методів нечіткої логіки.

**Об'єктом дослідження є** магістральний нафтопровід з постійним діаметром труби, що пролягає між двома нафтоперекачуючими станціями, який не має відведень і самопливних ділянок, яким перекачується однорідний нафтопродукт (переважно одним режимом транспортування).

**Результати:** досягнення вказаної мети забезпечується шляхом розв'язання наступних завдань: дослідження і аналіз методів і способів сучасних систем виявлення витоків; оцінка ефективності автоматизованих систем виявлення несанкціонованих витоків і відборів нафти з магістральних нафтопроводів на основі інтелектуальних технологій, у том числі побудованих на основі методів нечіткої логіки.

**Вступ.** Відносно невеликі виливи нафти і нафтопродуктів можуть мати наслідки тривалого характеру й спричинювати серйозні збитки. Досить часто забруднення ґрунтів і поверхневих вод нафтою і продуктами її перероблення призводить до забруднення ґрунтових вод, робить їх несприятливими для пиття. Нерідко ви-

ливи нафти і нафтопродуктів призводять до надзвичайних ситуацій, які є найбільш небезпечними за своїми екологічними наслідками. Аналіз надзвичайних ситуацій, пов'язаних із виливами нафти і нафтопродуктів на території Краснодарського краю, які відбулися протягом 1994-2006 рр., показав, що основний "внесок" (майже 70 %) належить магістральним і промисловим нафтопроводам. Основними причинами виникнення аварійних виливів нафти і нафтопродуктів на трубопроводному транспорті є зношення основних фондів та несанкціоновані втручання у цілісність трубопроводів. Загрози довікллю, які виникають під час експлуатації нафтопроводів, пов'язані з аварійними виливами нафти, особливо небезпечні, якщо вони супроводжуються потраплянням розлитої нафти у водні системи. А тому значну небезпеку для наземних екосистем становлять переходи трубопроводів через річки та озера [1].

Для своєчасного виявлення місця аварійної розгерметизації трубопроводу існує велика кількість методів.

До методів виявлення витоків висуваються такі основні вимоги [2]:

- точність визначення місця витоку;
- висока чутливість;
- висока міра надійності і автоматизації;
- достовірність інформації;
- відсутність перешкод, що чинять вплив на режим перекачування;
- безпека при експлуатації;
- забезпечення контролю стану трубопроводів великої протяжності;
- економічність.

У цій роботі приведений опис найбільш відомих методів постійного моніторингу витоків з нафтопроводів.

**Метод пониження тиску з фіксованою або ковзаючою установкою.** Цей метод включає два способи:

Порівняння тиску, розрахованого за гідравлічним ухилом нафтопроводу при його заданій пропускній спроможності, з тиском, визначуваним давачами тиску через певні проміжки часу. Розрахунок виконується аналітично. При цьому обчислюються значення тиску для кожної точки виміру з урахуванням зміни тиску і витрати перекачування на головній станції. Знайдені аналітично значення тиску порівнюються з відповідними вимірними значеннями тиску [3].

Вимір і порівняння локальних понижень тиску на трубопроводі. ЕОМ через певні проміжки часу фіксує усі значення тиску в точках виміру на ділянці трубопроводу і порівнює їх із записаними раніше. Якщо градієнт тиску перевищує заздалегідь встановлене значення (при постійній витраті), то спрацьовує сигнал тривоги. У обох способах витік визначається аналітично або за гідравлічним ухилом.

Переваги:

- забезпечення оперативного виявлення значних витоків;
- забезпечення безперервного контролю появи значних витоків;

- можливість автоматичної обробки вимірюваних даних і видачі результатів;
- простота обслуговування приладів;
- можливість застосування незалежно від напрямку перекачування;
- забезпечення оперативного автоматичного відключення насосів і перекриття засувок на пошкодженій ділянці трубопроводу при появі витоків.

Недоліки:

- можливість застосування тільки при сталому режимі експлуатації трубопроводу;
- неможливість застосування за наявності відведення і зміни діаметру трубопроводу;
- велика похибка визначення місця витоку;
- низька чутливість до величини витоку (непридатний для виявлення незначних витоків);
- можливість помилкових спрацьовувань системи аварійної зупинки трубопроводу.

**Метод порівняння витрат.** Метод заснований на постійності миттєвої витрати нафтопродукту на початку і у кінці ділянки трубопроводу за відсутності витоку і сталому режимі перекачування [4].

На вході і виході кожної ділянки трубопроводу встановлюються витратоміри турбінного або об'ємного типу, дистанційно пов'язані з комп'ютером, що знаходиться на центральному диспетчерському пункті. Інформація від витратомірів надходить до комп'ютера. Програма, встановлена на комп'ютері відповідно до алгоритму даного методу, безперервно проводить порівняння витрат на початку і у кінці кожної ділянки трубопроводу з урахуванням температурної поправки. У випадку, якщо різниця витрат перевищує допустиму межу, встановлену програмою, автоматично спрацьовує аварійна сигналізація, сповіщаючи про появу витоків.

Переваги:

- швидке виявлення значних витоків при сталому режимі перекачування;
- забезпечення безперервного дистанційного контролю виникнення значних витоків;
- забезпечення автоматичної обробки інформації, що надходить;
- забезпечення автоматичного припинення перекачування трубопроводом і перекриття засувок;
- можливість використання незалежно від погодних умов;
- відсутність впливу на режим перекачування.

Недоліки:

- низька точність при визначенні навіть значних витоків;
- низька чутливість до величини витоку;
- неправдиві свідчення системи в період пуску і припинення перекачування по трубопроводу;
- можливість використання компараторів витрати тільки на невеликих ділянках трубопроводу, оскільки вони не враховують температурну поправку і акумулюючу здатність трубопроводу (здатність накопичувати речовину);

– необхідність припинення перекачування трубопроводом в період зміни і ремонту турбінних витратомірів;

– наявність помилкових спрацьовувань системи при послідовному перекачуванні різних нафтопродуктів.

**Метод порівняння зміни швидкості витрат.** Метод заснований на миттєвій зміні швидкості витрат на початку і кінці ділянки трубопроводу при появі витоку [5].

На початку і кінці ділянки трубопроводу встановлюються вимірювальні діафрагми (звуження, що калібруються, дозволяють за різницею тисків до і після звуження розрахувати швидкість і витрату рідини), обладнані пристроями диференціювання. Електричні сигнали, пропорційні швидкості зміни витрати, каналами телеметрії безперервно надходять в диспетчерський пункт на вхід компаратора, де порівнюються з пороговими значеннями. Ушкодження або розрив нафтопроводу викликає різку зміну витрати нафти, що транспортується. Приблизне місце витоку можна визначити за різницею часів появи сплесків на трендах витрат в контрольних перерізах.

Переваги:

– можливість швидкого виявлення значних витоків при сталому режимі перекачування;

– забезпечення дистанційної і автоматичної обробки інформації про появу витоку, та вразі виникнення аварійного випадку припинення перекачування і перекриття засувок на усій ділянці трубопроводу;

– забезпечення безперервності контролю за появою значних витоків;

– відсутність впливу на режим перекачування і можливість застосування незалежно від погодних умов;

– економічність за рахунок використання простих і довговічних вимірювальних діафрагм;

– безпосередній вимір кількісних показників процесу перекачування, що дозволяє спростити алгоритми ухвалення рішення про наявність витоку.

Недоліки:

– низька чутливість до величини витоку;

– низька точність визначення місця витоку;

– можливість помилкових спрацьовувань при порушенні суцільного потоку, зміні властивостей партій перекачуваної нафти або нафтопродуктів і ускладненні технологічних режимів перекачування;

– необхідність припинення перекачування по трубопроводу для обслуговування витратомірів;

– можливість використання блоків порівняння витрати (компаратори) тільки на невеликих ділянках, оскільки вони не враховують акумулюючу здатність нафтопроводу.

**Кореляційний метод.** Кореляційний метод виявлення витоків в нафтопроводах і визначення місць їх розташування заснований на вимірі віброакустичного сигналу, генерованого вито-

ком, за допомогою двох давачів (п'єзодавачів), встановлених безпосередньо на трубопроводі [6].

Якщо два давачі встановити по обидві сторони (у двох колодязях) від передбачуваного місця витоку і за допомогою двоканалного аналізатора виміряти взаємно кореляційну функцію (функцію кроскореляції), то можна визначити різницю (затримку) часів поширення сигналу від місця витоку до першого і до другого давача.

Затримка визначається за максимумом функції кроскореляції сигналів, виміряних давачами. Знаючи швидкість поширення сигналу (звуку) трубою і відстань між давачами (колодязями, в яких вони встановлені), можна аналітично визначити місце розташування витоку. При цьому важливий правильний вибір частотного діапазону вимірювання і частотної смуги аналізу [7].

Точність визначення місця витоку за допомогою цього методу залежить від таких параметрів:

– точність вимірювання тимчасової затримки (точність ідентифікації максимуму кроскореляційної функції);

– точність виміру відстані між давачами;

– точність визначення швидкості поширення сигналу витоку по трубопроводу.

Точність визначення першого параметра залежить від точності вимірювального приладу як електронного пристрою і вживаних в нім алгоритмів програмної обробки сигналів, другого – від міри вивченої траси трубопроводу, третього – від відхилень швидкості поширення звуку по трубі від середнього значення (1200 м/с), які, у свою чергу, залежать від матеріалу і способу укладання труб, температури, тиску, складу перекачуваної рідини, структури ґрунту і т. д.

Переваги:

– ефективність при визначенні значних витоків;

– можливість застосування для будь-яких трубопроводів і будь-яких рідин в трубопроводах;

– безпека з екологічного погляду.

Недоліки:

– неможливість використання при визначенні малих витоків;

– можливість помилкових спрацьовувань сигналу;

– неекономічний, оскільки кореляційні теочошукачі є дорогими приладами, для роботи з якими необхідно створювати спеціально навчений гурт.

**Метод акустичної емісії.** Метод заснований на реєстрації високочутливими п'єзоелектричними давачами, розташованими на контрольованій ділянці трубопроводу, сигналів акустичної емісії (АЕ) про мікротріщини в стінці трубопроводу і про виток рідини [7].

Для виявлення місць витоків розроблено спеціальне устаткування для аналізу загасання і часу надходження імпульсів АЕ. За допомогою

спеціальної програми, встановленої на комп'ютер, аналізуються сигнали від п'єзодавачів і визначається різниця часів приходу звукових сигналів АЕ до перетворювачів. Комп'ютер обробляє інформацію, що надходить, і з урахуванням швидкості поширення сигналів АЕ і відстані між давачами на трубопроводі аналітично визначає розташування дефекту.

**Переваги:**

- ефективність при виявленні малих витоків;
- висока точність виявлення місць витoku;
- забезпечення автоматичної обробки інформації і видачі результатів обстеження технічного стану магістральних трубопроводів з вказівкою міри небезпеки дефектів;
- можливість застосування для будь-яких конструкцій нафтопроводів;
- можливість застосування для будь-яких нафтопродуктів;
- забезпечення високої міри достовірності результатів контролю.

**Недоліки:**

- необхідність великих тимчасових витрат для обстеження трубопроводів великої протяжності;
- висока вартість обстеження;
- залежність від погодних і кліматичних умов;
- необхідність установа п'єзодавачів з підсилювачами на поверхні труби, для чого вимагається шурфування;
- обмеження застосування, оскільки сигнали АЕ є шумоподібними, і у випадках, коли їх амплітуда мала, виділення корисного сигналу з перешкод є складним завданням.

**Метод лінійного балансу.** Метод заснований на постійності миттєвого і інтегрального значень об'ємів перекачуваної рідини на початку і наприкінці ділянки трубопроводу за відсутності витoku і в сталому режимі перекачування [6].

На вході і виході кожної ділянки трубопроводу встановлюються турбінні або ультразвукові лічильники вимірювання кількості перекачуваного нафтопродукту. Інформація від лічильників безперервно надходить по лінії зв'язку на вхід комп'ютера центрального диспетчерського пункту. У комп'ютері через певні різницеві проміжки часу (15÷30 с) проводиться порівняння об'ємів з урахуванням температурної поправки, в'язкості, щільності і тиску перекачуваного продукту. За відсутності витoku безперервні порівняння значень вимірних об'ємів на кінцях ділянки трубопроводу дозволяють зробити висновок про його герметичність. Якщо різницю об'ємів на вході і виході ділянки трубопроводу перевищує встановлене програмою значення, то включається аварійний сигнал про появу витoku.

**Переваги:**

- ефективність для швидкого виявлення значних витоків;
- забезпечення визначення величини значного витoku;

– забезпечення безперервності дистанційного контролю появи значних витоків;

– забезпечення автоматичної обробки інформації, що надходить, і видачі аварійного сигналу про появу витoku, припинення перекачування трубопроводом і перекриття засувки;

– можливість використання незалежно від конструкції трубопроводу і кліматичних умов.

**Недоліки:**

- неможливість точного визначення місця появи значного витoku;
- порівняно низька чутливість до величини витoku, неможливість використання для виявлення малих витоків;
- необхідність припинення перекачування трубопроводом для зміни і ремонту турбінних лічильників;
- збільшення похибки величини витoku при несталому режимі експлуатації трубопроводу і послідовному перекачуванні різних нафтопродуктів.

### **Метод ударних хвиль Жуковського.**

Н. Е. Жуковский запропонував визначати місця ушкоджень в трубопроводі за допомогою ударної діаграми (за кривою залежності тиску від часу), записаною при гідравлічному ударі, створеному швидким закриттям засувки у кінці ділянки труби [6, 7]. У літературі цей метод називається методом скануючих хвиль (методом ударної діаграми Жуковського).

Н. Е. Жуковским була отримана система рівнянь, що описує перехідний режим при гідравлічному ударі без урахування сил тертя по довжині. Фізичний сенс цих процесів полягає в перетворенні кінетичною і потенційною енергій, які визначають фізичні властивості середовища, і характер хвильових процесів, що відбуваються в ній. Рішення цих рівнянь отримані для випадку поширення імпульсу прямокутної форми уздовж трубопроводу, що ідеалізується. При цьому труба є циліндричною з постійною площею перерізу при початковому тиску, течія рідини трубою - одновимірною; гідравлічні опори для стаціонарних течій і несталого руху еквівалентні; стінки труби пружні і задовольняють закону Гука під навантаженням від тиску [5].

Висновок про наявність витoku робиться в результаті порівняння модельного рішення і тренду свідчень давача тисків наприкінці ділянки нафтопроводу, що діагностується. Знаючи швидкість поширення ударної хвилі в заданому трубопроводі, можна з достовірною точністю визначити місце ушкодження трубопроводу.

**Переваги:**

- відносно невисока вартість;
- майже миттєве отримання даних про стан трубопроводу;
- безперервність контролю в часі;
- ефективність при виявленні значних витоків (розривів) трубопроводу;
- незалежність від погодних умов;
- розташування устаткування в межах нафтової станції;

– забезпечення дистанційного моніторингу експлуатаційної ділянки;

– можливість виявлення витоку (несанкціонованого вривання) на стадії скидання (відбору) продукту з постійною витратою.

Недоліки:

– створення ударної хвилі шляхом швидко-го закриття засувки, що перекриває увесь переріз трубопроводу, внаслідок чого різко підвищується тиск (гідравлічний удар з амплітудою  $0,5 \div 1,0$  МПа) і може статися додаткове руйнування трубопроводу [5];

– можливість виявлення витоків при мікроударах тільки на ділянках трубопроводу невеликої протяжності близько декількох сотень метрів (при малих витоках) або декількох кілометрів (при великих витоках);

– низька чутливість до величини витоку;

– зниження чутливості методу при послідовному перекачуванні різних нафтопродуктів.

**Метод негативних ударних хвиль.** У багатьох роботах цей метод називається методом уловлювання хвиль тиску [10]. Ідея методу заснована на реєстрації фронту хвилі зміни тиску, яка виникає в місці розгерметизації трубопроводу. Координати місця виникнення витоку обчислюються за різницею часів приходу фронту хвилі на кінці контрольованої ділянки. Швидкість поширення хвилі зміни тиску дорівнює швидкості звуку в потоці, обмеженому стінками труби. При русі хвилі тиску її амплітуда поступово зменшується через наявність гідравлічного опору, причому зменшення тим більше істотно, чим більше швидкість потоку в трубопроводі. В результаті для технічної реалізації вказаного методу потрібні досить точні індикатори тиску.

Для підвищення точності визначення місця розташування витоку і напряму поширення хвилі тиску кількість давачів може бути збільшена, проте, загалом, для роботи системи вистачає двох давачів.

Переваги:

– безперервність контролю в часі;

– оперативне виявлення кримінальних врізань;

– висока вибірковість;

– можливість застосування незалежно від погодних умов.

Недоліки:

– необхідність підтримання такого тиску усередині нафтопроводу, який забезпечує повне заповнення перерізу нафтопродуктом;

– неможливість використання для контрольованих ділянок із складним профілем місцевості, особливо з великими перепадами висот поблизу пункту прийому нафтопродукту;

– низька чутливість до величини витоку;

– складність фіксації появи витоку в динамічному режимі за наявності коливань тиску, викликаних роботою насосних агрегатів і рухом елементів замкової арматури;

– зниження чутливості при послідовному перекачуванні нафтопродуктів різного типу;

– спотворення корисного сигналу на самопливних ділянках;

– неможливість використання методу на стадії скидання продукту при постійній витраті.

**Метод гідравлічної локації витоку.** Цей метод заснований на аналізі гідравлічних характеристик ділянки нафтопроводу. Метод локації місця витоку нафтопродукту і оцінки її інтенсивності заснований на вимірі гідравлічних ухилів на двох спеціально вибраних базисних сегментах, що знаходяться поблизу нафтоперекачуючих станцій [3]. Завдання полягає в тому, щоб вказати місце витоку нафти і оцінити її інтенсивність по зміні гідравлічних ухилів на цих сегментах.

Переваги:

– низька експлуатаційна вартість;

– використання тільки штатних засобів контрольно-вимірювальних приладів;

– візуалізація розподілу тиску по трасі;

– оперативність виявлення витоків;

– можливість визначення інтенсивності витоку.

Недоліки:

– низька чутливість ( $5 \div 15$  % номінального значення витрати трубопроводу), залежна від місця розташування дефектної ділянки [5];

– наявність зон на початку і кінці експлуатаційної ділянки, в яких витік з використанням цього методу не визначається;

– можливість застосування тільки при сталому режимі експлуатації ізотермічного трубопроводу;

– неможливість використання в трубопроводних мережах із скиданнями і підкочуваннями;

– помилкові спрацьовування системи виявлення витоків внаслідок того, що чутливість алгоритму до зміни прохідного перерізу труб в 35 разів вище за чутливість до витоку;

– зниження точності при зменшенні інтенсивності витоку.

**Класифікація методів постійного моніторингу витоків з нафтопроводів.** Класифікація методів виявлення витоків з нафтопроводів проводилася в роботах [5,8]. У справжній роботі класифікація методів проводиться по основних дев'яти критеріям, вказаним вище (див. таблицю).

Таким чином, методи постійного контролю забезпечують точне визначення місця виникнення витоку великої інтенсивності. Найбільш точно даним вимогам задовольняє метод акустичної емісії, який дозволяє визначати витік з високою точністю, є надійним методом без помилкових спрацьовувань, слабо залежить від кліматичних і погодних умов і має високий рівень безпеки, проте він є неекономічним і призначений для використання на нафтопроводах невеликої протяжності. Методами з низькою точністю є метод порівняння витрат, метод порівняння зміни швидкості витрат і метод лінійного балансу. Маючи високу точність, кореляційний метод допускає помилкові спрацьовування.

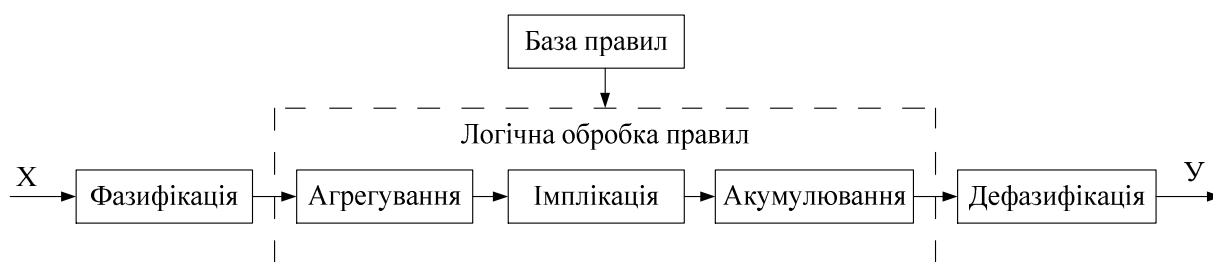


Рисунок 1 – Компоненти нечіткої моделі

Метод негативних ударних хвиль, метод ударних хвиль Жуковского і метод гідравлічної локації витoku економічні, дозволяють з високою точністю визначати витік, проте поступаються по ряду інших критеріїв.

Слід зазначити, що найточніше інтенсивність витoku може бути розрахована за допомогою методу лінійного балансу і методу гідравлічної локації витoku.

**Метод пониження тиску з фіксацією події на КП МН (Кучмистенко).** Ідея методу заснована на реєстрації фронту хвилі зміни тиску, яка виникає в місці розгерметизації трубопроводу [9]. Пункти контролю (КП), що розташовані на МН, самостійно оброблюють інформацію про достовірність зміни тиску і виробляють сигнал про виникнення аварійності МН контрольованої ділянки. За результатами обробки інформації обчислюється приблизне місце виникнення аварійної розгерметизації.

Для підвищення точності визначення місця розташування витoku і місця виникнення аварійної розгерметизації застосовується коридор доаварійної зміни тисків, який постійно коректується в залежності від режимів роботи МН, та оброблюється з використанням методів fuzzy logic.

Переваги:

- безперервність контролю в часі;
- оперативне виявлення кримінальних врізок;
- висока вибірковість;
- висока швидкість розрахунку;
- можливість використання без наявності мережі і зв'язку (у статичному режимі).

Недоліки:

- необхідність підтримки такого тиску усередині нафтопроводу, який забезпечує повне заповнення перерізу нафтопродуктом;
- низька чутливість до плавної зміни величини витoku;
- наявність зон на початку і кінці експлуатаційної ділянки, в яких витік з використанням цього методу не визначається;

Розглянемо деякі підходи до моделювання АСК за витками нафти з МН.

**Метод пониження тиску з фіксацією події на КП МН (Кучмистенко).** В цьому методі алгоритм адаптації параметрів математичної моделі враховує не лінійність процесу і підвищує чутливість системи контролю до змін в

системі при розгерметизації внаслідок аварії. Нечіткий алгоритм дає змогу встановити зв'язки між вхідними значеннями (тиск  $P(t)$  і вихідною змінною ідентифікація аварійності  $A(t)$ ), яка є необхідною для розрахунків аварійних станів трубопроводу, викликаних розгерметизацією ділянки трубопроводу [9].

Для створення певної структури нечіткої моделі для ідентифікації аварійності трубопроводу при розгерметизації в наслідок аварії врахуємо, що, як правило, застосовуються три структури [10]: комплексна структура моделі, паралельна структура моделі і каскадна структура моделі.

Кожна з цих структур має свої переваги і недоліки, але кожна з них має певні компоненти, які є спільними для всіх структур (рис. 1).

Інформаційна обробка вхідної інформації про зміну витрат рідини чи газу складається з таких основних процедур: фазифікації – встановлення вхідних лінгвістичних змінних  $X$  і їх функції належності  $\mu(x)$ , де  $x$  – неперервна базова змінна;  $x \in X$ ;  $0 \leq \mu(x) \leq 1$ ; інференціювання (агрегування, імплікації, акумуляування) – встановлення правил управління і лінгвістичної змінної, яка відповідає сигналу на виході; дефазифікації – перетворення лінгвістичних змінних на виході у неперервний сигнал на виході.

Тут маємо типову ситуацію, коли аварія „аварійна розгерметизація трубопроводу“ (АВ) може бути описана системою правил з нестохастичними складовими, а саме:

$$\text{if } P_i \text{ is } LE_1^j \text{ and } Q_{pi} \text{ is } LE_2^j \\ \text{then } AB_i \text{ is } LE_3^j; j=1, \dots, M, \quad (1)$$

тут  $LE_k^j$  ( $k=1, 2, 3$ ) є лінгвістичними термами „великий“, „середній“, „малий“, „дуже малий“ і т.п.;

$M$  – кількість правил.

Порівняння різних структур нечітких моделей, довело, що найменша похибка апроксимації, яка розраховувалася за формулою

$$\rho = \sum_{i=1}^M [A_{R_i} - A_{FM_i}]^2, \quad (2)$$

де  $A_{R_i}$  – фактичне значення контрольованого параметру;

$A_{FM_i}$  – розраховане за фаззі-моделлю значення вихідної величини;

$M$  – кількість правил, може бути отримана при використанні паралельних структур моделей ( $\rho=2,42$ ) і комплексних структур ( $\rho=2,21$ ).

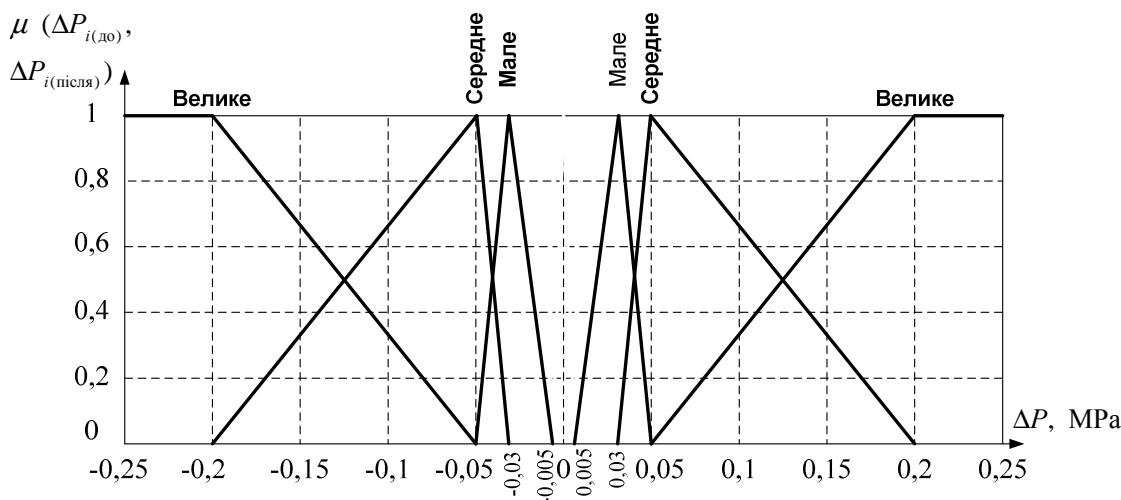


Рисунок 2 – Графік функції належності для термів лінгвістичної змінної "зміна тиску з КПР<sub>i</sub>"

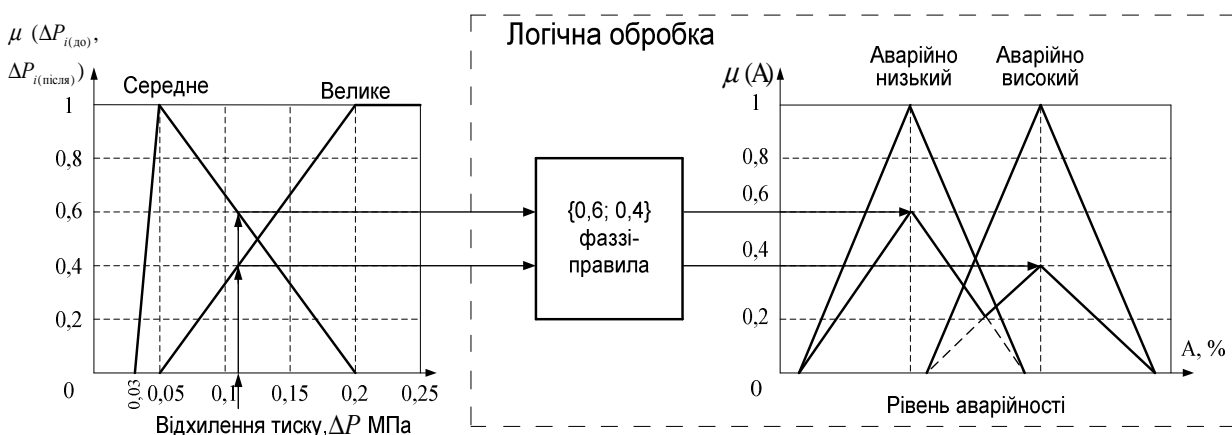


Рисунок 3 – Схема логічної обробки

Для вибору моделі скористаємося трьома критеріями якості, які характеризують:

- квадратичну похибку

$$\rho_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\bar{y}_i - y_i)^2;$$

- абсолютну похибку

$$\rho_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|Q(\bar{y}_i) - Q(y_i)|}{k-1};$$

- міру невизначеності

$$\rho_3 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [1 - \mu_y(\bar{y}_i)],$$

де  $\bar{y}_i$  - розраховане за моделлю значення вихідної величини  $y_i$ ;

$Q(\bar{y}_i); Q(y_i)$  - рівень квантування або номер  $j = 1, k$  ( $k$  - кількість змінних) інтервалу  $\Delta y_i$  або  $\Delta y_i$ , до якого належать значення  $\bar{y}_i$  або  $y_i$  відповідно.

Для побудови моделі автоматизованого контролю за витокami і несанкціонованими відборами нафти з нафтопроводу, в першу чер-

гу, для всіх змінних визначили відповідні лінгвістичні змінні. У нашому випадку таких лінгвістичних змінних три - це зміни тисків  $\Delta P_i$  (до),  $\Delta P_i$  (після) отриманий з лінійних КП телемеханіки КПР<sub>iv№</sub>, (КПР<sub>i+1</sub>, КПР<sub>i+2</sub>, КПР<sub>i-1</sub>, КПР<sub>i-2</sub>) і рівень аварійності. Кожна з них включатиме в себе чотири терми. При цьому будемо використовувати функції приналежності типу кусково-лінійних функцій. Нижче наводяться графіки конкретних функцій належностей для окремих лінгвістичних термів (рис. 2) і схема їх логічної обробки (рис. 3).

Задача контролю за витокami і несанкціонованими відборами нафти з МН розглядається як процес прийняття рішень в системі з одним вихідним параметром АВ (можливою аварією) і  $n$  вхідними параметрами. Ідея, яка лежить в основі формалізації причинно-наслідкових зв'язків між параметрами процесу транспортування нафти і, можливою, аварією, полягає в описі цих зв'язків на природній мові із застосуванням нечітких множин і лінгвістичних змінних.

**Метод негативних ударних хвиль.** В цьому методу вирішується завдання побудови класичного нечіткого регулювальника для управління фіксованою кількістю паралельно

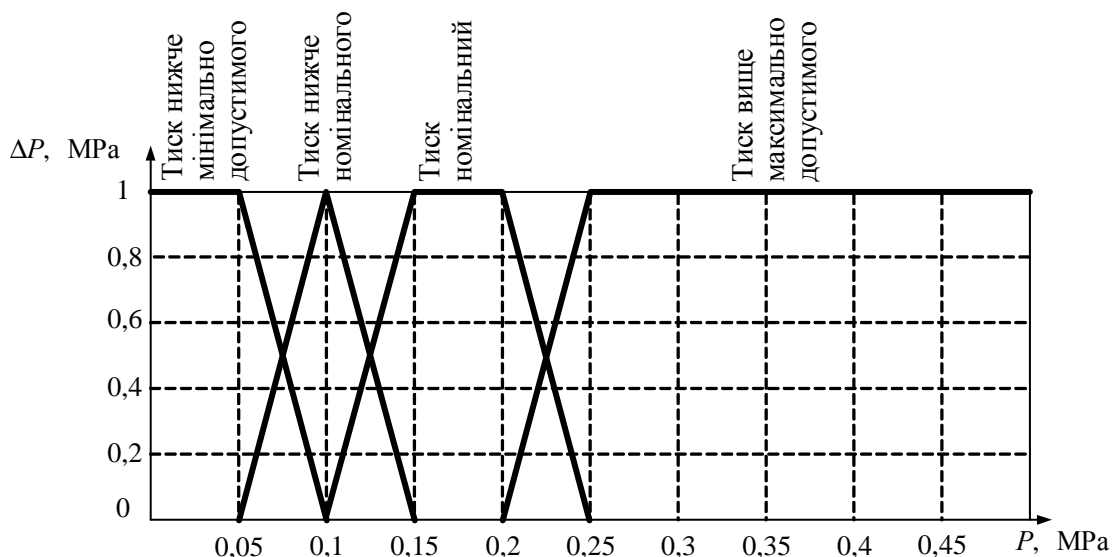


Рисунок 4 – Модель режимів функціонування МН в термінах нечіткої логіки

працюючих об'єктів, а так само розроблена методика формування універсальної бази правил для управління групою паралельно працюючих фільтрів. Завдання визначення моменту перемикання фільтру інтерпретується як завдання класифікації, що полягає у віднесенні об'єкта, заданого вектором інформативних ознак до одного із заздалегідь визначених класів. На основі аналізу режимів роботи фільтрів що характеризуються витратами води через фільтр і експертних оцінок, визначені наступні терми лінгвістичної змінної «режими роботи нафтопроводу»:

1. A1: «Тиск нижче мінімально допустимого» - робочий;
2. A2: «Тиск нижче номінального» - перед аварійний;
3. A3: «Тиск номінальний» - аварійний;
4. A4: «Тиск вище максимально допустимого» - аварійна зупинка.

Для формування нечіткої моделі об'єкту управління приймаються стандартні трапецієвидні функції приналежності.

$$\mu_{A_1}(x) = \min(\max(2 - 0.02 \cdot (x - 50), 0), 1), \quad (3)$$

$$\mu_{A_2}(x) = \max\left(1 - \frac{|x - 150|}{50}, 0\right), \quad (4)$$

$$\mu_{A_3}(x) = \min(\max(2 - 0.02 \cdot |x - 250|, 0), 1), \quad (5)$$

$$\mu_{A_4}(x) = \min(\max(2 - 0.02 \cdot (400 - x), 0), 1), \quad (6)$$

Сукупність функцій (3)-(6) дає нам модель режимів функціонування фільтру в термінах нечіткої логіки (рис. 4).

Для цих моделей були розроблені нечіткі регулювальники двох основних типів: Мамдані і Сугено для фіксованої кількості працюючих фільтрів. Кількість працюючих фільтрів в кожен момент часу прийнята рівною трьом, що є достатнім для моделювання максимально можливої кількості поєднань різних режимів роботи фільтрів. Поєднання режимів відповідних (3) і (6) виключені як що не зустрічаються на прак-

тиці. Рішення щодо перемикання фільтру приймається, виходячи з поєднання режимів усіх фільтрів блоку, що працюють в даний момент, і описується продукційними правилами. Кожне продукційне правило записується у виді «якщо ... то ...».

Для системи типу Мамдані сформульовано 46 продукційних правил. Операція дефазифікації для системи Мамдані проводилася по методу «найбільше з максимумів» як найбільш відповідного для вирішення завдань класифікації.

Як метод дефазифікації в системах типу Сугено застосовується метод «середньозважене». Застосування цього методу дозволяє брати участь в ухваленні остаточного рішення за декількома правилами, і скоротити кількість правил стосовно системи типу Сугено.

**Метод лінійного балансу.** Для розрахунку накопичувальних значень дисбалансів використовуються параметри "Поріг витoku (%)" і "Відносна похибка витратомірів (%)", задаються користувачем. Метод "лінійного балансу" заснований на аналізі перехідних процесів в трубопроводах при виникненні витoku. У момент виникнення витoku рідини в трубопроводі виникають зміни витрати нафти, які фіксуються в місцях, де встановлені витратоміри.

Як передати здібності людини комп'ютеру для моделювання, оптимізації та управління складними промисловими об'єктами. Для вирішення такого завдання потрібні спеціальні методи формалізації нечіткості і обробки нечіткої інформації, наприклад, математичний апарат теорій нечітких множин і можливостей.

Відомі такі структури математичних моделей, які розробляються на основі методів теорій нечітких множин та можливостей [6]:

1. Нечіткі регресивні моделі на основі регресійного аналізу з урахуванням нечіткості вихідних параметрів (вхідні чіткі)



$$\tilde{y}_j = \tilde{a}_{0j} + \sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \tilde{a}_{ikj}x_{ij}x_{kj} + \dots, j = \overline{1, m} \quad (7)$$

де  $\tilde{y}_j$  - нечіткі вихідні параметри системи (локальні критерії);

$x_{ij}x_{kj}$  - вхідні вимірювані параметри моделюваної системи;

$\tilde{a}_{0j}, \tilde{a}_{ij}, \tilde{a}_{ikj}$  - оцінювані нечіткі коефіцієнти.

2. Лінгвістичні моделі на основі правил логічного виведення

Якщо  $\tilde{x}_1 \in \tilde{A}_1 (\tilde{x}_2 \in \tilde{A}_2 (\dots (\tilde{x}_n \in \tilde{A}_n) \dots))$   
то  $\tilde{y}_j \in \tilde{B}_j, j = \overline{1, m}$  (8)

де  $\tilde{x}_i, \tilde{y}_j$  - відповідно, вхідні і вихідні лінгвістичні змінні об'єкта,

$\tilde{A}_i, \tilde{B}_j$  - нечіткі підмножини, що характеризують  $\tilde{x}_i, \tilde{y}_j$ .

Наведемо основні пункти алгоритму синтезу математичних моделей на основі 1-го підходу/

Алгоритм синтезу моделей на основі нечітких рівнянь множинної регресії:

1. Вибрати, необхідні для побудови моделі, вхідні  $x_i \in X_i$  і вихідні  $y_j \in Y_j$ , параметри об'єкта.

2. Провести збір інформації та на основі експертної процедури визначити терм-множина нечітких параметрів, що описують стан об'єкта.

3. Визначити структуру нечітких рівнянь множинної регресії  $f_j(x_1, \dots, x_n, \tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$ ,  $j = \overline{1, m}$  (рішення задачі структурної ідентифікації).

4. Побудувати функцію належності нечітких параметрів об'єкта і коефіцієнтів моделі.

5. Оцінити нечіткі значення коефіцієнтів  $(\tilde{a}_{0j}, \tilde{a}_{1j}, \dots, \tilde{a}_{nj})$  обраних функцій  $y_j$  (рішення задачі параметричної ідентифікації).

6. Перевірити умову виконання адекватності моделі. У разі неадекватності моделі з'ясувати причину і повернутися до відповідного пункту, інакше - модель рекомендується до застосування.

На основі вищенаведеного алгоритму побудови моделей технологічних об'єктів з урахуванням нечіткості вихідної інформації, розроблено структуру математичних моделей основних технологічних агрегатів нафтопроводного комплексу: СПН; НПС і ЛЧ магістрального трубопроводу (структурна ідентифікація).

Станції підготовки нафти (дозувальна установка для введення депресорної присадки). Для визначення впливу вхідних і режимних параметрів на вихідні параметри дозувальної установки при нечіткості деякої частини вихідної інформації на основі статистичних даних та експертної оцінки визначено структуру рівняння з нечіткими коефіцієнтами, що оцінює продуктивність (9) і регресивні рівняння, що описують залежність в'язкості і тиску на виході СПН від вхідних параметрів (10):

$$\tilde{Y}_1 = \tilde{a}_{01} + \tilde{a}_{11}x_{11} + \tilde{a}_{21}x_{21} + \tilde{a}_{31}x_{31} + \tilde{a}_{41}x_{41} + \tilde{a}_{51}x_{11}^2 + \tilde{a}_{61}x_{21}^2 + \tilde{a}_{71}x_{31}^2 + \tilde{a}_{81}x_{41}^2 + \tilde{a}_{91}x_{21}x_{41} \quad (9)$$

$$y_j = a_{0j} + a_{1j}x_{1j} + a_{2j}x_{2j} + a_{3j}x_{3j} + a_{4j}x_{4j} + a_{5j}x_{1j}^2 + a_{6j}x_{2j}^2 + a_{7j}x_{1j}x_{2j}, j = 2, 3 \quad (10)$$

де  $\tilde{Y}_1, y_j, j=2,3$  відповідно, продуктивність, в'язкість і тиск на виході дозувальної установки;

$\tilde{a}_{01}, \tilde{a}_{1j}, \dots, \tilde{a}_{7j}$  визначаються на основі експертної (нечіткої) інформації;

$a_{0j}, a_{1j}, \dots, a_{7j}$  - регресійні нечіткі коефіцієнти;

$x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{7j}$  - чіткі регресійні коефіцієнти; відповідно, в'язкість, тиск, витрата депресорної присадки і нафти на вході дозувальної установки.

Насосно-перекачувальних станцій: НПС характеризується нечіткістю продуктивності. Тому, для них на основі вищеописаного підходу і алгоритму синтезу моделей в нечіткій середовищі ідентифікована структура моделі (11), а для визначення тиску на виході НПС, ідентифікована структура множинної регресії (12):

$$\tilde{Y}_1 = \tilde{a}_{01} + \tilde{a}_{11}x_1 + \tilde{a}_{21}x_2 + \tilde{a}_{31}x_1^2 + \tilde{a}_{41}x_2^2 + \tilde{a}_{51}x_1x_2 \quad (11)$$

$$y_2 = a_{02} + a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + a_{32}x_1^2 + a_{42}x_1x_2 \quad (12)$$

де  $\tilde{Y}_1$  - продуктивність,

$y_2$  - тиск на виході НПС;

$\tilde{a}_{01}, \dots, \tilde{a}_{nm}$  оцінювані нечіткі коефіцієнти (вільний член, коефіцієнти лінійної частини, взаємного впливу і нелінійної частини);

$a_{01}, \dots, a_{nm}$  - ідентифіковані коефіцієнти регресії;

$x_1, x_2$  - відповідно, тиск і густина нафти на вході насоса.

## Висновки

У роботі представлені основні методи постійного контролю витоків в нафтопроводах. Приведена класифікація представлених методів, на основі якої можна зробити наступні висновки:

1) жоден з розглянутих методів виявлення витоків не задовольняє усім вимогам, що висуваються до них;

2) найбільш точні методи засновані на використанні спеціальних пристроїв додаткової діагностики, що встановлює певної періодичності застосування цих методів;

3) за допомогою існуючих методів моніторингу цілісності трубопроводів практично неможливо виявити "кримінальні" витіки (несанкціоновані врізання в нафтопроводи) внаслідок короткочасності їх використання або малої інтенсивності.

На основі проведеного дослідження можна зробити висновок про необхідність створення спеціального методу виявлення витоків, застосовного для визначення параметрів малих витоків з нафтопроводу, у тому числі несанкціонованих врізань (таблиця 1).

Таблиця 1 - Класифікація методів постійного моніторингу витоків з нафтопроводу

Метод контролю	Точність	Чутливість	Надійність і автоматизація	Достовірність інформації	Завадостійкість	Приблизний час на отримання результату, хвилин	Кількість продукційних правил	Кількість задіяних точок контролю
Метод порівняння витрат	н	н	в	н	н	10÷16	-	2÷10
Метод пониження тиску з фіксованою чи ковзаючою установкою	в	н	в	н	н	3÷10	-	10÷50
Метод порівняння зміни швидкості витрат	н	н	в	н	н	4÷11	-	2÷10
Кореляційний метод	в	н	в	н	в	10÷15	-	10÷50
Метод акустичної емісії	в	в	в	в	н	6÷12	-	2÷10
Метод лінійного балансу	н	н	в	в	н	15÷20	до 100	2÷10
Метод ударних хвиль Жуковского	в	н	в	в	н	6÷12	до 50	10÷50
Метод негативних ударних хвиль	в	н	в	в	н	6÷12	до 100	2÷10
Метод гідравлічної локації витоку	в	н	в	в	н	5÷10	-	2÷10
Метод пониження тиску з фіксацією події на КП МН (Кучмистенко)	в	в	в	в	н	1÷3	до 150	2÷10

Примітка: н - низький рівень, в - високий рівень.

Критичний аналіз існуючих способів і методів виявлення витоків показав, що на сьогоднішній момент, незважаючи на велику кількість різноманітних САК витоків і несанкціонованих відборів не існує універсальної методики. Кожен з методів не позбавлений недоліків. Основними недоліками є висока вартість реалізації, низька точність локалізації, велике число помилкових спрацьовувань, складність реалізації. Таким чином, проблема дослідження нових способів виявлення витоків залишається відкритою.

Використовуючи чисельні методи, можна на ЕОМ отримати кількісні характеристики перехідного процесу в нафтопроводі. Проте час розв'язання конкретних технологічних задач достатньо великий і в більшості практичних випадків він більший, ніж сталі часу. Для вирішення задач контролю за витоками і несанкціонованими відборами нафти час розв'язання вихідної системи рішень має суттєве значення, тому застосовуються різні спрощені системи рівнянь.

Ці припущення базуються на деякому компромісі між достатньою простотою формалізованого опису процесів і складними ефектами, які є істотними для функціонування реальних елементів МН.

Прийняття рішень стосовно точності математичних моделей, що розробляються, залежить від бази даних, мети досліджень і часу використання моделі в задачах контролю несанкціонованих витікань нафти.

Інакше кажучи, елементи МН, параметри яких мають найбільшу чутливість, звичайно повинні описуватися тільки точними моделями,

і навпаки, для опису елементів з низькою чутливістю можна застосувати спрощені моделі.

На сьогодні для отримання спрощених математичних моделей елементів МН найбільш широко використовуються методи лінеаризації, теорії наближених функцій, апроксимації перервних елементів з розподіленими параметрами і дискретних елементів з зосередженими параметрами. Застосування цих методів, хоча і дозволяє досить швидко розраховувати параметри МН великої розмірності, але не дає можливості дослідити вплив індивідуальних характеристик елементів на властивості МН, а також взаємозв'язки елементів структури.

Відомий формальний метод складання і розрахунку систем рівнянь матеріальних і гідравлічних балансів МН на базі використання математичної топології і теорій графів, який дозволяє автоматизувати процедуру розрахунку МН. Проте більшість МН описується системами суттєво нелінійних рівнянь, які враховують третя та інші закономірності процесів, що відбуваються в елементах МН. Використання кусково-лінійної апроксимації для розрахунків таких систем значно зменшує переваги названих методів.

Характерною особливістю багатьох елементів МН є наявність в них лінійної частини з змінними коефіцієнтами гідравлічного опору, тому доцільно розглядати квазістаціонарні режими, які в першому наближенні описуються звичайними рівняннями стаціонарно текучого потоку при фіксованих в часі параметрах потоку або динамічні режими роботи системи.

В роботі [11] доведено, що використання методів синтезу МН з урахуванням їх динаміки на основі варіаційного числення, визначення

умов оптимальної стабілізації динамічних режимів, визначення умов стійкості на базі 2-го методу Ляпунова та інших дозволяє вирішувати лише окремі питання математичного опису, тому вони не можуть бути рекомендовані як універсальні методи для системного аналізу нестационарних режимів МН.

Слід зауважити, що сам по собі математичний опис ще не дає можливості судити про властивості об'єкта моделювання. Для вивчення властивостей об'єкта моделювання на базі його математичного опису потрібні ще алгоритм і програма розв'язання системи рівнянь математичного опису.

Проте існуючий детермінований математичний опис не дозволяє вирішити питання контролю за несанкціонованими відборами нафти з нафтопроводу внаслідок суттєвої невизначеності цього процесу.

Крім того, неможливо побудувати адекватну математичну модель для поставленої задачі, і в моделі присутня велика кількість параметрів у тому числі і таких, що не залежать від часу.

Тому доцільно скористатися методами теорії нечітких множин та нечіткої логіки, яка знайшла широке застосування в сфері промислового виробництва різних країн світу – США, Японії, ФРН, Бельгії, Швеції та інших. [12]

Нечітка логіка є методом системного підходу і базується на інтуїції та досвіді експертів, використовуючи елементи повсякденної мови для опису поведінки систем контролю із використанням теорії нечітких множин.

Звичайні методи контролю несанкціонованих витікань нафти з нафтопроводу мають ряд недоліків, пов'язаних зі складністю обробки сигналів і великим часом запізнення  $t$ . Крім того, несанкціоновані витікання нафти можуть бути створені через невеликі відбори діаметром 20 мм і більше, що не викликає суттєвих змін тиску і масової витрати на моніторі диспетчера. Це створює невизначеність в прийнятті рішень диспетчером, що веде до неправильних рішень щодо запобігання несанкціонованим відборам нафти. Тому існуючі моделі, що з успіхом використовують для визначення часу і місця великого відбору нафти, повинні бути удосконалені за рахунок додаткових моделей, які базуються на методах нечіткої логіки в теорії нечітких множин, щоб врахувати досвід і інтуїцію експертів. Це питання є дуже важливим, оскільки кількість несанкціонованих відборів нафти з магістральних нафтопроводів системи «Укртранснафта» сягає близько 60 відборів на рік.

Модель, яка створюється з позицій системного підходу, повинна задовольняти таким вимогам:

- мати певну точність при контролі несанкціонованих витікань нафти з магістрального нафтопроводу в залежності від інтенсивності зміни основних параметрів;
- суворо виконувати основні закони фізики і, в першу чергу, закон збереження;
- містити ретельно розроблену і непротивічну систему операцій, необхідну для експе-

риментального визначення параметрів або функцій, що входять до конструкцію моделі, і для перевірки ступеня відповідності моделі фізичній реальності;

- використовувати умови збереження розмірності, стійкості, коректності за Адамаром, фізичної реалізованості;
- бути придатною для широкого діапазону контролю несанкціонованих відборів нафти;
- всебічно відображати взаємозв'язані витоки нафти з показниками і параметрами технологічного процесу транспортування нафти;
- мати прості математичні вирази, які добре описують процес і дозволяють ідентифікувати коефіцієнти моделі за оперативними промисловими результатами;
- математичні вирази повинні бути прив'язані до конкретних умов експлуатації трубопроводу;
- фактори, які явно не відображаються моделлю, повинні враховуватись як обмеження або бути сталими.

В умовах невизначеності процесів витікань, несанкціонованих відборів нафти саме використання методів нечіткої логіки дозволяє здійснити контроль за цими порушеннями технічного стану МН, оскільки побудувати адекватну математичну модель для поставленої задачі контролю в умовах невизначеності неможливо і така задача не розв'язується класичними методами.

Задача контролю за витоками і несанкціонованими відборами нафти з МН розглядається як процес прийняття рішень у системі з одним вихідним параметром АВ (можливою аварією) і  $n$  вхідними параметрами. Ідея, яка лежить в основі формалізації причинно-наслідкових зв'язків між параметрами процесу транспортування нафти і можливою аварією, полягає в описі цих зв'язків на природній мові із застосуванням нечітких множин і лінгвістичних змінних.

### *Література*

- 1 Гринчишин Н.М. Причини та наслідки витоків нафти і нафтопродуктів на трубопроводному транспорті у Львівській області [Електронний ресурс]: [http://nvunfu.esy.es/Archive/2015/25\\_8/32.pdf](http://nvunfu.esy.es/Archive/2015/25_8/32.pdf)
- 2 Вайншток С. М. Трубопроводный транспорт нефти: учеб. для вузов: В 1 т. / С. М. Вайншток, В.В. Новоселов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов и др. – М.: НедраБизнесцентр, 2004. – Т. 1. – 407 с.
- 3 Вайншток С. М. Трубопроводный транспорт нефти: учеб. для вузов: В 2 т. / С. М. Вайншток, В.В. Новоселов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов и др. – М.: НедраБизнесцентр, 2004. – Т. 2. – 621 с.
- 4 Кутуков С. Е. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах // Нефтегаз. Дело, 2004. – Т. 2. – 2945 с.

5 Abhulimen K. E. Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation/ K.E. Abhulimen, A.A. Susu // Chem. Engng J, 2004. N 97. – 47-67 p.

6 Gorny M. Monitoring acoustic noise in steel pipelines // Proc. of the 7th Intern. pipeline conf., Calgary (Canada), Sept. 29 Oct. 3, 2008. Alberta: ASME, 2008. - 18-26 p.

7 Лапшин Б. М. Взаимно спектральный метод обнаружения утечки на трубопроводах с односторонним доступом / Б.М. Лапшин, А.Л. Овчинников // Дефектоскопия. – 2004. – № 9. – 19-26 с.

8 Geiger G. Principles of leak detection // Fundamentals of leak detection. KROHNE oil and gas. 2005.

9 Семенцов Г.Н. Фаззі-модель для імітаційного моделювання несанкціонованого витікання нафти з нафтопроводу / Г.Н. Семенцов, О.В. Кучмистенко // Академический вестник. – Кривой Рог, 2004. – № 13. – С. 84-86.

10 Кучмистенко О.В. Метод контролю за витоками і несанкціонованими відборами нафти з магістральних нафтопроводів: дис. ...канд. техн. наук: 20.06.06/ Кучмистенко Олександр Васильович. – Івано-Франківськ, 2006. – 186 с.

11 Гольянов А. А. Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2002. – № 10. – 514 с.

12 Семенцов Г.Н. Фаззі-логіка в системах контролю / Г.Н. Семенцов, І.І. Чигур, М.В. Шавранский, В.С. Борин. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 70 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
13.06.16*

*Рекомендована до друку  
професором **Горбійчуком М.І.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук **Воцинським В.С.**  
(ТОВ Івано-Франківське спеціальне  
конструкторське бюро засобів автоматизації,  
м. Івано-Франківськ)*