

*Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу*



*Заячук Ярослав Іванович*

*На правах рукопису*

**УДК 681.513.5:622.691.4**

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМИ  
АГРЕГАТАМИ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ З  
УРАХУВАННЯМ ЇХ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

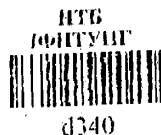
*05.13.07 – Автоматизація процесів керування*

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук*

*Науковий керівник*

*доктор технічних наук, професор*

*Горбійчук Михайло Іванович*



## ЗМІСТ

	ВСТУП.....	6
	АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПРИМУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	12
1.1	Математичні моделі, які використовуються при керуванні процесом компримування природного газу .....	12
1.2	Критерії оптимального керування процесом компримування природного газу.....	17
1.3	Методи розв'язку задач оптимального керування процесом компримування природного газу.....	19
1.4	Аналіз методів ранжирування об'єктів за їх технічним станом.....	30
1.5	Обґрунтування і вибір напрямку досліджень.....	40
2	МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ОБ'ЄКТІ.....	42
2.1	Характеристика компресорної станції як об'єкта оптимального керування....	42
2.2	Умови та методика проведення експериментальних досліджень.....	44
2.3	Основні показники, які характеризують технічний стан газоперекачувальних агрегатів та методи їх визначення.....	58
	Висновки до розділу.....	67
3	МЕТОД РАНЖИРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ЇХ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ.....	68
3.1	Експертна система оцінки технічного стану газоперекачувального обладнання на основі нечіткої логіки .....	68
3.2	Принципи ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом.....	71
3.3	Метод та алгоритми ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом .....	72

4.4	Проведення промислових досліджень на об'єкті з метою ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом.....	106
	Висновки до розділу.....	107
	<b>ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПРИМУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....</b>	<b>108</b>
4.1	Обґрунтування та вибір методу побудови математичних моделей процесу компримування природного газу.....	108
4.2	Метод та алгоритми побудови математичних моделей нагнітачів природного газу.....	120
4.3	Формалізація задачі оптимального керування процесом компримування природного газу.....	129
4.3.1	Оптимізація технологічного режиму компресорної станції.....	131
4.4	Розробка методу та алгоритмів оптимальне керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану .....	132
4.4.1	Програма оптимізації процесу компримування газу.....	137
4.4.2	Розв'язок задачі оптимізації.....	138
4.5	Оцінка економічної ефективності розробленої системи оптимального керування роботою ГПА.....	139
	Висновки до розділу.....	141
5	<b>КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМИ АГРЕГАТАМИ .....</b>	<b>142</b>
5.1	Структура системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами з врахуванням їх технічного стану .....	142
5.2	Апаратне та програмне забезпечення системи керування роботою компресорної станції.....	143
5.2.1	Апаратне забезпечення системи.....	143
5.2.2	Аналіз програмного забезпечення верхнього рівня системи.....	144
5.3	Спеціальне програмне забезпечення системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами .....	149
5.3.1	Структура спеціального програмного забезпечення.....	149

	4
3.2 Інтегратор задачі оптимального керування.....	158
4 Результати опробування системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану в умовах Долинського лінійного виробничого управління магістральними газопроводами .....	166
Висновки до розділу.....	170
ВИСНОВКИ.....	171
ДОДАТКИ.....	173
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	213

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВЦН – відцентровий нагнітач

ГПА – газоперекачувальний агрегат

ГГД – газотурбінний двигун

ГТП – газотурбінний привод

ГТУ – газотурбінна установка

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

ЕП – електропривод

ЕС – експертна система

КО – керований об'єкт

КС – компресорна станція

КЦ – компресорний цех

ЛВУМГ – лінійне виробниче управління магістральних газопроводів

ЛП – лінійне програмування

МГВА – метод групового врахування аргументів

МНК – метод найменших квадратів

ТНГ – турбіна низького тиску

ЦЛП – Цілочисельне програмування

УМГ – управління магістральних газопроводів

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У зв'язку з поступовим виснаженням енергоресурсів на нашій планеті проблема створення енергозберігаючих технологій стає з кожним роком усе більш гострою. Питання енергозбереження дуже гостро постає і в Україні, оскільки близько 80% таких енергоносіїв як нафта і газ наша країна імпортує з інших країн. Тим часом споживання енергії на одиницю валового продукту в Україні в 3-4 рази вище, ніж у країнах Західної Європи. Для виходу країни на самозабезпечення енергоресурсами необхідно знизити енергосміність нашої продукції та споживання природного газу принаймні на 40%.

Для імпорту й транзиту енергоносіїв до країн Західної та Центральної Європи Україна має розгалужену нафто- і газотранспортну систему загальною протяжністю близько 35 тис. км. Для компенсації втрат тиску на магістральних газопроводах встановлено 72 КС загальною потужністю 5,4 млн.кВт. Витрати газу на власні потреби тільки по УМГ Прикарпаттрансгаз складають біля  $32 \cdot 10^3$   $\text{нм}^3/\text{год}$ . За цих умов важливого значення набувають питання раціонального використання енергоресурсів, які витрачаються на переміщення газу магістральними газопроводами. Один із шляхів вирішення цієї задачі є адаптивне керування роботою компресорних станцій з врахуванням реального технічного стану агрегатів. Дослідження показали, що таке керування дає змогу зменшити витрату енергоресурсів на 1,5 – 2 %. А це дасть економію близько 4 млн. грн. за рік по УМГ “Прикарпаттрансгаз”. Тому тема дисертаційної роботи, яка передбачає дослідження в напрямку створення системи оптимального керування роботою газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Вибраний напрямок досліджень є складовою частиною тематичного плану Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ).

Дисертаційна робота виконана у відповідності з основним науковим напрямком діяльності кафедри комп'ютерних систем та мереж ІФНТУНГ. Тематика роботи є частиною планових державних науково-дослідних програм із розвитку нафтогазового комплексу України та базується на результатах держбюджетної роботи - "Синтез комп'ютерних систем і мереж для об'єктів нафтогазового комплексу" (затв. Науковою радою ІФНТУНГ 26.09.2005р., пр. №5/31 ). Дослідження, що викладені в дисертації, зроблені також в рамках госпдоговірної роботи №223/2001 "Система оптимального керування паралельно працюючими компресорними станціями з ГПА з різними приводами" (номер державної реєстрації – 0105U004900), де автор був безпосереднім виконавцем розділів робіт із розроблення мікропроцесорної системи оптимального керування компресорними станціями з ГПА із різними приводами (розділ 6), та держбюджетної роботи "Науково – методичні основи діагностування та управління у нафтогазовій промисловості для оптимізації витрат енергоресурсів" (номер державної реєстрації – 0107U001560), де автор був безпосереднім виконавцем розділів робіт із розроблення комп'ютерної системи адаптивного керування роботою ГПА, яка враховує технічний стан газоперекачувального обладнання та із розроблення методики ранжирування ГПА за їх технічним станом.

**Мета роботи і задачі дослідження.** Метою даної роботи є підвищення ефективності керування технологічним процесом компримування природного газу шляхом зменшення споживання паливного газу із врахуванням реального технічного стану газоперекачувального обладнання.

Досягнення вказаної мети вимагає вирішення таких задач:

1. Проаналізувати існуючі методи і засоби оптимального керування процесом компримування природного газу.
2. Розробити метод ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом.
3. Побудувати адекватні процесу компримування природного газу математичні моделі.

4. Розвинути спосіб розв'язку задачі оптимізації роботи паралельно працюючих агрегатів з врахуванням їх технічного стану, обмежень на технологічні параметри та впливу навколишнього середовища для економії паливного газу.

5. На основі отриманих емпіричних моделей, алгоритмів ранжирування та оптимізації розробити систему оптимального керування процесом компримування природного газу та її програмне забезпечення.

6. Розроблені алгоритми і програми оптимального керування адаптувати для промислового використання в системах контролю і керування процесом компримування природного газу.

7. Випробувати розроблений демонстраційний прототип системи оптимального керування у виробничих умовах та оцінити очікуваний економічний ефект від її використання.

*Об'єктом дослідження* є технологічний процес компримування природного газу на компресорній станції з агрегатами із газотурбінним приводом.

*Предметом дослідження* є автоматизовані системи керування процесом компримування природного газу на основі методу та алгоритмів оптимального керування процесом.

*Наукова новизна одержаних результатів* полягає у тому, що:

*вперше:*

- розроблено метод ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом на засадах нечіткої логіки, який визначає ГПА, що знаходяться в кращому технічному стані, і є підставою для розв'язку задачі оптимізації;

*удосконалено:*

- метод побудови математичних моделей газоперекачувальних агрегатів на засадах самоорганізації моделей, який, на відміну від відомого методу найменших квадратів, дає змогу отримати оптимальну за складністю модель;



*дістав подальший розвиток:*

- метод розв'язку задачі оптимального розподілу потоків газу між паралельно працюючими агрегатами з врахуванням їх технічного стану, обмежень на технологічні параметри та впливу навколишнього середовища, що дало змогу раціонально використати потенційні можливості кожного із агрегатів та зменшити споживання паливного газу. На основі цього методу розроблені та синтезовані ефективні алгоритми функціонування системи оптимального керування, яка забезпечує економію паливного газу.

***Практичне значення одержаних результатів.*** Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили отримати такі практичні результати:

- на основі створених емпіричних моделей, алгоритмів структурної та параметричної оптимізації, нечіткої логіки розроблена система оптимального керування газоперекачувальними агрегатами, яка забезпечує ефективне керування процесом компримування газу на основі вартісного критерію з врахуванням як планового завантаження агрегатів, обмежень на технологічні параметри, так і їх реального технічного стану ІПА;

- розроблені алгоритми і програми, адаптовані для промислового використання в системі контролю і керування процесом компримування природного газу;

- розроблений демонстраційний прототип системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану, який включає в себе програмне забезпечення та штатні засоби автоматизації і випробуваний у виробничих умовах Долинської компресорної станції. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 3 млн. 790 тис. грн. за рік в цінах 2008 року (акт від 18.09.2008р.);

- окремі розділи дисертаційної роботи використані у навчальному процесі при вивченні дисциплін: "Спеціалізовані комп'ютерні системи" студентами спеціальності 6.091500 – комп'ютерні системи та мережі, та "Промислові мережі" студентами спеціальності 6.092500 – автоматизація технологічних процесів (акт від 25.09.2008р.).

**Вірогідність результатів.** Вірогідність отриманих наукових результатів зумовлена як теоретичними, так і експериментальними дослідженнями, які базуються на пасивному експерименті, індуктивному методі моделювання, який заснований на принципі самоорганізації і мінімального обсягу апріорної інформації про об'єкт; на методах нелінійного програмування з широким використанням сучасних програмних продуктів для розв'язку задач оптимізації, теорії нечітких множин, а також на методах синтезу системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формуванні мети та задачі дослідження, обґрунтуванні наукових положень, проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, науковому обґрунтуванні та розробці відповідних рекомендацій. Усі положення дисертації, які виносяться на захист, основні результати теоретичних та експериментальних досліджень отримані автором особисто. В усіх роботах, які написані у співавторстві, здобувачеві належить ініціатива ідей, постановка задач дослідження, вибір та обґрунтування їх рішень. В надрукованих роботах, здобувачеві, зокрема, належать: [146] – сформульована задача оптимального керування процесом компримування природного газу на базі багатофакторних емпіричних моделей і техніко-економічних критеріїв; [134] – запропоновано розв'язок задачі оптимізації процесу компримування газу; [147, 156] – запропонована структура мікропроцесорної АСК оптимального керування групою КС із різнотипними ГПА; [25] - розроблена методика експериментальних досліджень з метою отримання емпіричних математичних моделей ГПА; [29, 30] - приведені результати імітаційного моделювання роботи компресорної станції з прилеглими трубопроводами; [152, 125] - формалізована задача ранжирування нагнітачів за їх технічним станом, та вибраний метод її розв'язку; [142] - побудовані математичні моделі нагнітачів природного газу на основі індуктивного методу побудови моделей; [153] – розв'язана задача оптимізації роботи нагнітачів природного газу із врахуванням їх технічного стану; [155] – вирішена задача оптимального керування роботою паралельно працюючих ГПА,

яка враховує як поточний стан об'єкта, так і вплив зовнішнього середовища на роботу компресорних агрегатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи обговорювались: на 11-ій міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика – 2004" (м. Київ; 2004); на міжнародній науково-практичній конференції "Мікропроцесорні пристрої та системи в автоматизації виробничих процесів - 2004" (м. Хмельницький, 2004); на Всеукраїнській науковій конференції "Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики" (м. Львів, 2004); на IX міжнародному форумі "Радиоелектроника и молодежь в XXI веке" (м. Харків, 2005); на 13-ій міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика – 2006" (м. Вінниця, 2006); під час роботи школи-семінару "Методи і засоби діагностики в техніці та соціумі (МіЗДТС-2007)" (м. Івано-Франківськ, 2007); на 15-ій міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика – 2008" (м. Одеса, 2008).

**Публікації.** Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи опубліковані у 13 роботах, з яких 7 – у фахових виданнях. З кількості опублікованих робіт - 3 одноосібні.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, додатків, переліку використаних джерел із 167 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 229 сторінок, з яких основний зміст викладено на 164 сторінках. Робота проілюстрована 43 рисунками та включає 17 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПРИМУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

#### 1.1. Математичні моделі, які використовуються при керуванні процесом компримування природного газу

Основним елементом КС є газоперекачувальний агрегат (ГПА), який функціонально і конструктивно складається із привода і компресора (нагнітача). Привод нагнітача може бути двох типів: газотурбінна установка (ГТУ) і електропривод (ЕП).

Математична модель процесу компримування природного газу використовується при усіх процедурах планування і керування режимами. Варіантом керування КС є схема з'єднання і набір частот обертання для ГПА. Цей варіант однозначно задає режими роботи КС.

Основою для побудови математичної моделі відцентрових нагнітачів (ВЦН) є графічні газодинамічні характеристики, які будуються за даними замірів при заводських випробуваннях.

Стендові характеристики ВЦН будуються для номінальних умов випробувань, тобто значень температури газу  $T_n$ , коефіцієнта стисливості газу  $Z_n$ , газової сталої  $R$  та частоти обертання вала нагнітача  $n_n$  за номінальних умов. Тому частіше користуються зведеними характеристиками, які випускають ВЦНДІГазом (С. Н. Сеницын) і є вдалими для розрахунку режимів КС при відхиленні параметрів газу від номінальних [1,2]. Характеристики представлені у вигляді залежностей:

$$\varepsilon = \varphi_1(Q_{ac,zo}; n_{zo}), \quad (1.1)$$

$$\eta = \varphi_2(Q_{ac,zo}), \quad (1.2)$$

$$\left[ \frac{N_n}{P_n} \right]_{zo} = \varphi_3(Q_{ac,zo}), \quad (1.3)$$

де  $\varepsilon$  - ступінь підвищення тиску газу у ВЦН;

$\eta$  - політропний к.к.д. ВЦН;

$Q_{ac}$  - об'ємна продуктивність ВЦН за умов всмоктування, м<sup>3</sup>/с,

$Q_{ac, зв} = \frac{n_u}{n} Q_{ac}$  - зведена об'ємна продуктивність ВЦН, м<sup>3</sup>/с;

$n_{зв}$  - зведена відносна частота обертання вала ВЦН;

$n$  - фактична частота обертання вала нагнітача, хв.<sup>-1</sup>;

$T_{вс}$  - фактичне значення температури газу, К;

$\left[ \frac{N_u}{\rho_u} \right]_{зв} = \left( \frac{n_u}{n} \right)^3 \cdot \frac{N_u}{\rho_u}$  - зведена відносна потужність;

$N_u$  - номінальна потужність, МВт;

$\rho_u$  - густина природного газу за номінальних умов, кг/м<sup>3</sup>.

У зарубіжній практиці як основну базову графічну характеристику нагнітачів застосовують  $Q$ - $H$  характеристику. При використанні тричленної моделі наближення цієї характеристики в формі [3]:

$$H = a + bQ_{ac, np} + cQ_{ac, np}^2, \quad (1.4)$$

де  $a, b, c$  - визначаються на основі формул [3];

$H$  - питома робота нагнітача, Дж/кг,

немає необхідності в перерахунку реальних і зведених значень, тобто змінні в формулі (1.4) є реальні величини  $H$  і  $Q_{вс}$ .

Автори роботи [4] пропонують дещо іншу залежність:

$$H = a_1 + a_2 n + a_3 n^2 + (a_4 + a_5 n + a_6 n^2) G + (a_7 + a_8 n + a_9 n^2) G^2,$$

де  $a_1, a_2, \dots, a_9$  - визначаються на основі формул [3];

$G$  - масова витрата газу, кг/с.

Для машинних розрахунків КС запропоновані різні способи апроксимації залежностей (1.1-1.3), описані в роботах [5-18].

Автори [19] пропонують модель ВЦН для нерозрахункових режимів роботи

$$\varphi = q\varphi_0 + K_\psi(q), \quad K_\psi(q) = -0.667q^2 + 0.55q + 0.117,$$

$$\eta = \frac{\psi}{q\left(\frac{\psi_0}{\eta_{\max}}\right) + K_\eta(q)}, \quad K_\eta(q) = A(1-q), \quad A = (1.8 - \eta_{\max}),$$

де  $0.4 \leq q \leq 1.6$ ;

$\varphi, \varphi_0$  - безрозмірні коефіцієнти витрати;

$\psi, \psi_0$  - безрозмірні коефіцієнти напору;

$\eta$  - коефіцієнт корисної дії (к.к.д.);

$\eta_{\max}$  - максимальний к.к.д.;

$K_\eta$  - критерій зміщення характеристики за к.к.д.;

$K_\psi$  - критерій зміщення характеристики за напором.

Індекс «0» визначає належність параметра оптимальному режиму роботи ВЦН, що характеризується максимальним значенням політропного к.к.д.  $\eta_{\max}$ .

Наведена математична модель дає можливість аналітично визначити у безрозмірній формі робочі характеристики  $\psi = f(\varphi), \eta = f(\varphi)$  нагнітача через відомі газодинамічні параметри в оптимальному режимі роботи.

За базову математичну модель компресорної станції у роботі [20] взято модель [21] та модифіковано її з врахуванням втрат напору та зміни температури газу на обв'язці та допоміжному обладнанні:

$$P_{ax}^2 - P_{ax_i}^2 = \lambda_{ax} Q_i^2, \quad i = 1, \dots, M, \quad P_{aux}^2 - P_{aux_i}^2 = \lambda_{aux} Q_i^2, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$T_{ax_i} = T_{ax} \exp(-\alpha_i Q_i^{-1}), \quad i = 1, \dots, M, \quad Q_i = f_i(P_{ax_i}, T_{ax_i}, P_{aux_i}, n_i), \quad i = 1, \dots, m,$$

$$G_i = g_i(P_{ax_i}, T_{ax_i}, P_{aux_i}, P_a, t_a, n_i), \quad i = 1, \dots, m,$$

де  $Q_i$  - об'ємна продуктивність  $i$ -го нагнітача;

$P_{ax}, P_{aux}$  - тиск, відповідно, на вході та виході  $i$ -го нагнітача;

$T_{ax_i}$  - температура на вході  $i$ -го нагнітача;

$P_{ax}$ ,  $P_{aux}$  - тиск, відповідно, на вході та виході компресорного цеху;

$g_i$ ,  $f_i$  - функції, вид яких визначається математичною моделлю ГПА;

$n_i$  - частота обертання валу  $i$ -го нагнітача;

$G_i$  - масова витрата паливного газу  $i$ -м ГТД;

$P_a$ ,  $t_a$  - атмосферний тиск та температура;

$\lambda_{ax_i}$ ,  $\lambda_{aux_i}$ ,  $\alpha_i$  - узагальнені коефіцієнти гідравлічного і термічного опору;

$m$  - кількість нагнітачів.

Автори роботи [22] запропонували математичний опис роботи ВЦН, що враховує енергетичні втрати на витікання газу і тертя дисків. Запропонована діагностична модель дає змогу відслідковувати зміну діагностичних ознак у часі й на їх основі робити висновки про технічний стан нагнітача.

Проведений аналіз роботи компресорних станцій [23,24] виявив, що для нагнітачів з ГТП – витрата паливного газу  $G$ , температура газу на виході нагнітача  $t_{c,aux}$ , продуктивність нагнітача  $Q$ , є функціями частоти обертання валу нагнітача  $n$ , температури газу на вході в нагнітач  $t_{c,ax}$ , ступеня підвищення тиску газу ВЦН  $\varepsilon$ , тиску газу на вході в нагнітач  $P_{c,ax}$  та температури навколишнього середовища  $t_c$ , тобто  $\{G, t_{c,aux}, Q\} = \varphi_i(n, t_{c,ax}, \varepsilon, P_{c,ax}, t_c)$ ,  $i=1,3$ . Відповідно для температури газів за турбіною низького тиску (ТНТ) отримано:

$$t_{aux,c} = \varphi_4(n, t_{c,ax}, \varepsilon, P_{c,ax}, t_c).$$

Для математичного опису використано багатовимірну нелінійну апроксимацію (регресійну модель), яка має вигляд многочлена:

$$y = \sum_{s=1}^k a_s \prod_{i=1}^N u_i^{b_{is}},$$

де  $a_s$  - коефіцієнти полінома (параметри моделі);

$b_{is}$  - невід'ємні цілі числа, які обмежені величинами  $c_i$  ( $0 \leq b_{is} \leq c_i$ ).

Коефіцієнти моделі розраховуються за методом найменших квадратів.

Нестационарний, ізотермічний потік газу в трубопроводі математично можна описати з допомогою системи диференціальних рівнянь в часткових похідних та алгебраїчних рівнянь. Такими рівняннями є рівняння нерозривності, яке виражає закон збереження маси, і рівняння руху, що витікає із закону Ньютона [25-29]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{2\lambda\rho w^2}{D} + \rho g \sin(\theta) + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = 0,$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{P}{\rho^2} \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0,$$

$$P = \frac{ZRT}{M_w} \rho, \quad z = f_z(P, T),$$

де  $x$  – довжина трубопроводу, м;

$t$  – час, с;

$P$  – тиск газу, МПа;

$g$  – прискорення земного тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$\rho$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$\theta$  – кут нахилу трубопроводу;

$D$  – діаметр трубопроводу, мм;

$w$  – швидкість газу, м/с;

$Z$  – коефіцієнт стисливості газу;

$M_w$  – молекулярна маса газу;

$R$  – газова стала, кДж/(кг·К).

З проведеного аналізу математичних моделей, які використовуються для опису ВІЦН, видно, що вони не враховують вплив навколишнього середовища, зокрема тиску та температури, на роботу нагнітача, або враховується частково [23]. Тому виникає задача побудови математичної моделі, адекватної процесу компримування природного газу.



## 1.2. Критерії оптимального керування процесом компримування природного газу

У сучасній теорії і практиці автоматичного керування проблемам оптимізації надається все більше уваги. Рішення цих проблем дозволяє здійснити керування найрізноманітнішими агрегатами, апаратами і технологічними процесами в умовах неповноти апріорної і поточної інформації щодо характеристик об'єкту і впливів зовнішнього середовища.

При автоматизації технологічних процесів оптимальні системи можуть відноситися до різних рівнів керування: окремих установок, окремих технологічних процесів, автоматичного керування всіма технологічними процесами виробництва. При цьому автоматичні системи керування цими процесами, звичайно, є адаптивними системами. Складність проблем адаптації в системах керування полягає в глибині самої концепції адаптивної поведінки, в її багатокритеріальності, в різноманітті характеру невизначеності інформації про керований процес і зовнішнє середовище. Існує величезна кількість публікацій по теорії адаптивного керування, зміст яких наочно ілюструє сказане. Зокрема, в монографії Я.З. Ципкіна [30] проблема адаптації обговорюється для досить широкого класу задач. В книзі Дж. Сарідіса [31] якнайповніше висловлені основні підходи до синтезу систем, що самоорганізуються.

Головною задачею системи оптимального керування компресорним цехом (КЦ) є підтримання продуктивності КС на заданому рівні при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами і технологічними об'єктами.

Хронологія застосовування критеріїв оптимальності свідчить про тенденції в оптимальному керуванні процесом транспортування природного газу.

В 70-х роках минулого століття з причини паливного дефіциту магістральні газопроводи експлуатувались в режимі максимальної пропускної здатності. Максимізація режиму за максимумом продуктивності [32] - основний критерій роботи вітчизняних магістральних трубопроводів того часу.



Якщо виходити із схеми дворівневого керування роботою газотранспортної системи, то на думку авторів роботи [32], замість алгоритму оптимізації режиму за критерієм максимального завантаження і мінімуму енерговитрат [33-35] можна використовувати енергетичний метод розрахунку режиму роботи багатоцехової КС [36].

За цим критерієм оптимізація здійснюється в два етапи. На першому етапі знаходять варіант, що забезпечує максимальну пропускну здатність газопроводу при заданих технологічних обмеженнях - тиск на вході та виході КС і тиск на початку газопроводу.

На другому етапі оптимізація здійснюється за другим критерієм - сумарних енергетичних витрат. При цьому як обмеження виступають пропускну здатність трубопроводу, яка знайдена на першому етапі оптимізації. Оптимізувати роботу компресорних станцій за мінімумом сумарної потужності пропонують і цілий ряд інших авторів [37,38].

В сучасних умовах, коли об'єми поставок природного газу, як правило, оговорені, застосовують економічні критерії оптимальності. До них відносять: максимум к.к.д. та вище згаданий критерій мінімуму енерговитрат [39-41].

При використанні того чи іншого критерію оптимальності необхідно враховувати такі вихідні дані [39]:

- схему з'єднань газоперекачувальних агрегатів в компресорному цеху;
- схему з'єднань компресорних цехів з лінійною частиною газопроводу;
- фактичні характеристики ГПА;
- значення тиску або витрати на виході із компресорної станції.

В результаті розв'язку оптимізаційної задачі повинні бути визначені [39]:

- оптимальна кількість нагнітачів і схема їх з'єднання на КС;
- продуктивність різних груп ГПА;
- потужності як для кожного агрегату, так і для КС в цілому;
- резерв потужності;
- коефіцієнт завантаження агрегатів та витрати на транспортування.

### 1.3. Методи розв'язку задач оптимального керування процесом компримування природного газу

В роботі [37] задача оптимізації роботи компресорних станцій розглянута для однотипних нагнітачів. Як вихідна інформація використовуються статичні характеристики нагнітача, побудовані в координатах: ступінь підвищення тиску газу в нагнітачі  $\varepsilon$  - зведена витрата  $Q_{np}$ , і є сімейством характеристик для зведеної частоти обертання вала нагнітача  $n_{np}$ , на якому виділяють область керування, яку утворюють – зверху і знизу – граничні значення частоти обертання вала нагнітача; зліва – крива помпажу; справа – крива гальмування (рис.1.1).

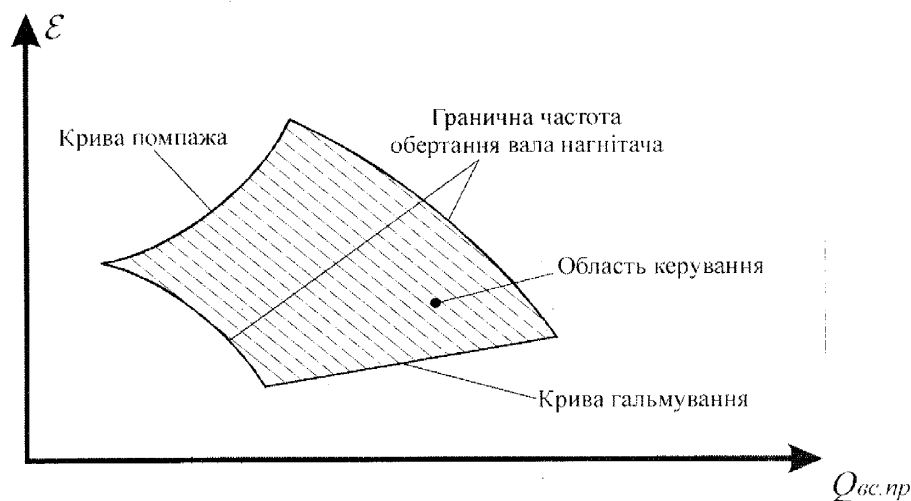


Рис. 1.1. Область керування для нагнітача

Як критерій оптимальності прийняті мінімальні загальні витрати потужності на компримування газу:

$$\min : N = \sum_{i=1}^m \lambda_i r_i \quad (1.5)$$

$$\text{де } \lambda_i = \frac{\varepsilon^{(\lambda-1)/\lambda} - 1}{\eta_i};$$

$\lambda$  - показник адіабати;

$\eta_i$  – к.к.д.  $i$ -го нагнітача;

$m$  – кількість нагнітачів;

$r_i$  – коефіцієнт рециркуляції.

Поставлену задачу розв'язано методом організованого перебору, який відомий під назвою методу віток і меж [42].

В роботі [38] розглянута задача оптимального керування роботою КС, яка працює за послідовно-паралельною схемою. Для кожної вітки послідовно ввімкнених нагнітачів будується еквівалентна характеристика у відповідності з методикою, що викладена в роботі [37].

Тоді критерій оптимальності формується для  $m$  паралельно ввімкнених віток у такій формі:

$$\min : J(Q_k) = \sum_{i=1}^m N_i(Q_{ki}), \quad (1.6)$$

де  $N_i(Q_{ki})$  – енерговитрати  $i$ -ої вітки;

$Q_{ki}$  – комерційна продуктивність  $i$ -ої вітки.

Статичні характеристики енерговитрат нагнітачів від продуктивності, які наведені, наприклад в роботі [43], апроксимовані квадратичним тричленом

$$N(Q_k) = aQ_k^2 + bQ_k + c,$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – коефіцієнти апроксимації.

В структуру задачі оптимізації, поряд з критерієм (1.6), входять обмеження, що визначають баланс газу:

$$Q_k = \sum_{i=1}^m Q_{ki}.$$

Подібна задача розглянута [44] для групи електроприводних ГПА.

Brown та Chui [45] пропонують для кожної ділянки трубопроводу апроксимовані залежності для тиску, витрати і температури газу на основі статичних моделей за реальними оперативними даними. Оптимізація здійснена простим пошуком оперативних стратегій і вибору необхідної кількості компресорів. Стратегії з найнижчими витратами енергії відображаються оператору. Заощадження енергії було оцінено у 340000\$ за перші півроку використання.

Graham та інші [46] використовують динамічну модель для статичної оцінки та прогнозних обчислень. Статична оцінка перевіряє коректність SCADA вимірювання і обчислює значення для параметрів процесу, які не вимірюються апаратними засобами. Прогнозні обчислення виконуються off-line. Замість того, щоб встановлювати дорогі пристрої для вимірювання витрати та тиску, автори пропонують використовувати значення цих параметрів, розрахованих на основі їх математичної моделі.

Метою оптимального керування є - максимізація тиску в трубопровідній системі [47]. Для цього активно використовується on-line моделювання. А статична оптимізація використовується, тільки якщо виникли конфлікти при on-line моделюванні.

Wheeler і Whaley [48] розширюють модель реального часу Shaw [49]. Головними завданнями on-line моделювання є: зменшення енергетичних витрат на стиснення газу; ідентифікація невикористаних можливостей трубопровідної системи; забезпечення більшою інформацією клієнтів.

Значення для відповідного тиску компресорної станції та вибір необхідної кількості компресорів в прогнозних моделях вибираються на основі простих правил, отриманих із практичного досвіду, наприклад: "якщо всі компресори, які працюють, завантажені більше ніж на 90% максимальної потужності, тоді запускають новий компресор на цій станції".

Bryant і Varo'n [50] використовують повну динамічну модель подібно до [48] трубопровідної системи. Поведінка трубопровідної системи передбачається моделюванням на основі прогнозованих потоків газу. Для визначення оптимальних значення змінних КС і вибору необхідної кількості нагнітачів використовується емпіричний метод. Запропонована модель здатна скоротити енергоспоживання на 12%.

Автори [51-53] використовують експертну систему (ЕС), яка призначена для того, щоб скоротити енергоспоживання трубопровідної системи. Вміст бази

знань побудованих на людському досвіді роботи трубопровідної системи. Заощадження енергії становить 0.5%.

У роботах [54-56] обговорюється динамічне програмування як інструмент статичної оптимізації. Динамічне програмування та генетичні алгоритми оптимізаційної задачі були випробувані на розгалуженій та закільцьованій трубопровідній системі, яка містить 66 компресорних станцій. З допомогою динамічного програмування було знайдено оптимальне рішення, що забезпечує скорочення енергоспоживання на 38%. Генетичний алгоритм потребував декількох місяців для налаштування різних внутрішніх параметрів алгоритму, і в результаті знайдене оптимальне рішення зменшувало енергоспоживання на 28%.

Рое [57] використовує детальні статичні моделі трубопроводу та компресорної станції. Алгоритм оптимізації обчислює оптимальну кількість компресорів та вихідний тиск для КС, який визначається на основі вхідного тиску. Функцією вартості є енергоспоживання або продуктивність трубопроводу. Пошук оптимізаційного рішення активізується вручну, зазвичай декілька разів на день. Скорочення енергоспоживання складає біля 10%.

Suming Wu [58] розглядає завдання зменшення витрати палива компресорними станціями. Змінні рішення включають вихідні тиски, масові потоки в кожній вітці трубопроводу, і кількість компресорів, що працюють на кожній компресорній станції. Критерій оптимальності формується для  $m$  паралельно ввімкнених нагнітачів у такій формі:

$$g(G, p_s, p_d) = \min_{r \in \Omega} \left\{ r g^{min} \left( \frac{G}{r}, p_s, p_d \right) \right\},$$

де  $g^{min}(G, p_s, p_d)$  - функція споживання паливного газу;

$G$  - масова витрата паливного газу;

$p_s$  - тиск на вході;

$p_d$  - тиск на виході;

$\Omega = \{r : r \text{ is integer}, 1 \leq r \leq m\}$ ;

$m$  - кількість компресорів.

Для простих випадків, коли можливо знайти оптимальні рішення, зменшення витрат палива становило 15-20%. Для складніших випадків [59], коли неможливо було знайти оптимальне рішення, змогли розрахувати нижні і верхні межі енергетичних витрат.

В статті [60] представлено систематичний підхід для визначення режиму роботи КС, який відповідає вказаному профілю. Першим кроком в розвитку цього підходу є використання числового методу для аналізу неізотермічного потоку в трубопроводі. Потім оптимізація КС сформульована як стандартна задача нелінійного програмування (NLP) у наступній формі: знайти значення вектора змінних  $b = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ , щоб мінімізувати цільову функцію  $F(b)$ , при обмеженнях  $g_j(b) \leq 0, j = 1, \dots, m$ . Тут,  $n$  представляє число оперативних параметрів, оптимальне значення яких повинне бути визначене, а  $m$  - число оперативних обмежень, які повинні бути вказані.

Пакет оптимізації складається з трьох головних частин [61]:

1. Математичної моделі, яка описує споживання палива компресором.
2. Алгоритму оптимізації, що працює в межах всіх розумних комбінацій устаткування, і забезпечує необхідні значення продуктивності та тиску.
3. Графічного інтерфейсу (GUI) користувача, який робить використання оптимізатора простим і інтуїтивним для диспетчера.

Оптимізатор заснований на алгоритмі, який використовує набір лінійних і нелінійних методів, щоб знайти оптимальний режим роботи в залежності від того, яким є завдання оптимізації: чи це вартість палива чи продуктивність. Оптимізатор досягає цього знаходженням необхідного тиску на виході компресорної станції і вибором комбінації нагнітачів [62]. Математично, оптимізатор вирішує задачу мінімізації споживання палива, визначивши спочатку задану продуктивність компресорної станції, а потім вибирає найкращий режим роботи.

Інженери і технічний персонал КС використовують правила і процедури на мові експертної системи, яка визначає некоректні дані і замінює їх надійнішою інформацією, а також забезпечує контролери рекомендаціями для поліпшення

роботи трубопроводу [63-64]. У статті розглядається інтеграція експертної системи і симулятора трубопроводу (SP).

Проблема зменшення споживання паливного газу розглядається і у роботах [65-66]. Модуль [66] призначений забезпечити практичне керівництво для операторів для досягнення ефективного використання паливного газу, виходячи із технічного стану кожного компресора. Логічна блок-схема, представлена на рис. 1.2, призначена допомогти ідентифікувати різні стратегії оптимізації роботи компресорів.

Вибір необхідної кількості компресорів - одна з первинних функцій в роботі газопроводів природного газу [67], і основним завданням є мінімізація експлуатаційних витрат.

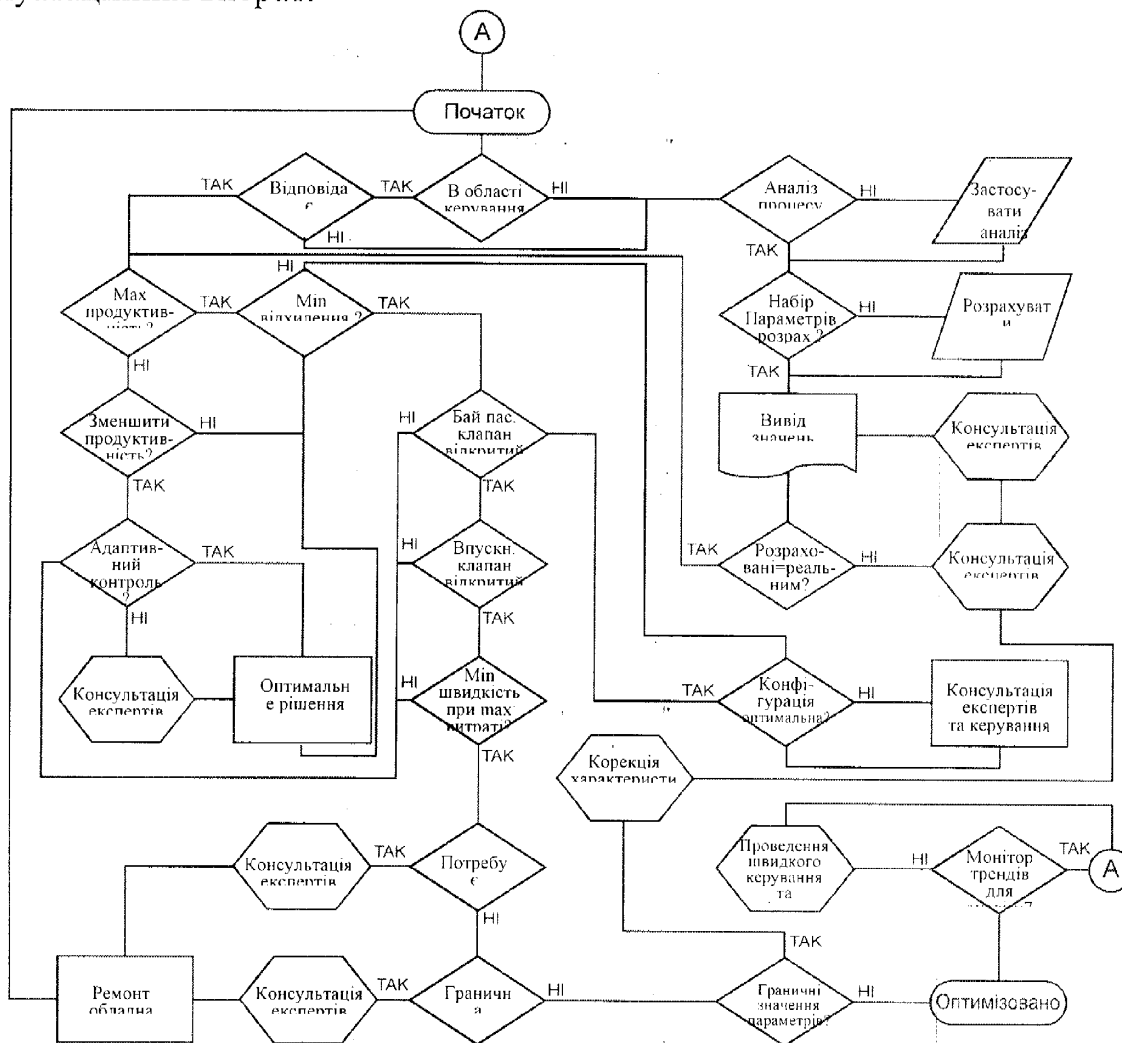


Рис. 1.2. Алгоритм програми оптимізації роботи компресора



Автори пропонують порівняння трьох методів автоматизації для вибору компресорів: змішане цілочислове лінійне програмування (МІЛР), генетичні алгоритми (GA) та експертні системи (ES) [68-70]. При виборі кількості компресорів, диспетчери часто запускають та зупиняють компресори, виходячи зі статусу трубопроводу і прогнозованого споживання без будь-якої гарантії оптимальних дій. Тому виникає завдання створення системи забезпечення ухвалення рішень, яка може вибирати компресори виходячи із реальних даних.

Цільова функція в моделі представляє повні операційні вартості в межах вказаного періоду функціонування, які є сумою паливних витрат, вартості обслуговування для кожного компресора, вартості пуску компресора після простою, тощо, та матиме вигляд:

$$\min J = \sum_{i=1}^{n_c} X_i \cdot (F_i + M_i + S_i),$$

де  $F_i$  - вартість паливного газу для  $i$ -го компресора;

$n_c$  - кількість компресорів;

$M_i$  - вартість обслуговування  $i$ -го компресора;

$S_i$  - вартість пуску  $i$ -го компресора після простою;

$X_i = 1$  якщо компресор включений та  $0$ , якщо компресор виключений.

Оптимізація великої газотранспортної мережі приводить до зменшеного часу гідравлічного аналізу, зменшеного споживання паливного газу, і загалом вдосконаленої роботи трубопроводу. Автори [71-75] оцінюють практичне і технічне значення генетичного алгоритму оптимізації.

Зазвичай є дві фундаментальні цільові функції роботи мережі газопроводу. Вони сформульовані таким чином:

*Мінімальне споживання палива, виражене цільовою функцією:*

$$\min \left\{ \sum_{r \in R} g(m, P_s, P_d)_r \right\},$$

при таких обмеженнях:

$$N_{r,\min} < N < N_{r,\max}, \quad n_{r,\min} < n < n_{r,\max},$$

$$P^l \leq P \leq P^U, \quad A^T P^2 = \phi(G), \quad Am = S,$$

де  $g(m, P_s, P_d)_r = \alpha \frac{mH}{\eta}$ ;

$\alpha$  - стала;

$A$  - матриця коефіцієнтів;

$\phi$  - гідравлічна функція трубопроводу.

*Максимальна продуктивність:*

$$\max : Q = \sum_{k=1}^m Q_k.$$

Автори роботи [76-78] подають такий критерій оптимальності: точне підтримання продуктивності на виході цеху з розподілом навантаження між агрегатами, який забезпечує мінімізацію енергетичних затрат на витрату паливного газу. Розподіл навантаження між агрегатами виконується у відповідності до їх коефіцієнтів технічного стану. Керуючий вплив пропорційний коефіцієнтам технічного стану.

Витрата паливного газу пропорційна потужності нагнітача і коефіцієнту технічного стану турбіни високого тиску (ТВТ). Потужність турбіни розраховується за формулою:

$$N = 0.00981 \frac{k}{k-1} RZ (T_{вих} - T_{вх}) Q,$$

де  $\frac{k}{k-1}$  - показник політропи.

Значення температури  $T_{вих}$  і тиску  $p_{вих}$  на виході нагнітача моделюється згідно рівнянь газової динаміки.

Для коефіцієнта технічного стану нагнітача  $K_{T.C.}$  формула має вигляд:

$$K_{T.C.} = 1 - \frac{\eta_{пол(пас)} - \eta_{пол}}{\eta_{пол(пас)}} \quad (1.7)$$

де  $\eta_{пол(пас)}$  - паспортний політропний к.к.д. нагнітача;

$\eta_{пол}$  - політропний к.к.д. нагнітача.

В програмному забезпеченні спільно реалізований розрахунок параметрів нагнітачів, робота ПІ-регулятора режиму та оптимізаційний алгоритм пошуку оптимального розподілу навантаження.

У роботі [79] розроблено концепцію та технічні рішення сучасної АСК ТП КС, яка забезпечує експлуатацію КС з мінімальними енерговитратами. Функцію пошуку оптимального розподілу навантаження реалізовано за принципами екстремального регулювання.

У статті [80] розглянуто питання визначення оптимального режиму роботи з паралельним включенням ГПА, за якого ефективний сумарний к.к.д. групи паралельно включених ГПА з повнонапірними відцентровими нагнітачами має максимально можливе значення. Оптимальне керування здійснюється з урахуванням фактичного стану та області допустимих режимів ГПА. Основою для визначення області допустимих режимів є характеристики агрегатів в реальних умовах експлуатації.

Задача оптимізації у цій постановці зводиться до задачі знаходження умовного екстремуму функції

$$F = \sum_{i=1}^m \left( \frac{Q_i}{\eta_{ГПАi}} + \lambda Q_i \right),$$

де  $\lambda$  - множник Лагранжа;

$\eta_{ГПАi}$  - к.к.д.  $i$ -го нагнітача.

Максимальне значення  $\eta_{\Sigma}$  буде при  $Q_i$ , що є рішенням системи рівнянь

$$\begin{cases} \eta_{ГПАi} - Q_i \frac{d\eta_{ГПАi}}{dQ_i} + \lambda \eta_{ГПАi}^2 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^m Q_i = Q_{\Sigma} \end{cases}$$

де  $Q_{\Sigma}$  - сумарна продуктивність паралельно включених ГПА.

Задача оптимізації розподілу навантаження між ГПА визначає коефіцієнти розподілу навантаження між ГПА, які дорівнюють:

$$K_i = \frac{Q_i^{OPT}}{Q_{\Sigma}}$$

де  $Q_i^{OPT}$  - необхідне оптимальне значення об'ємної продуктивності  $i$ -го ГПА.

Автори роботи [20] вважають, що оптимізація режиму роботи КС полягає у виборі такої структури станції та параметрів режиму роботи її обладнання, які б забезпечували розв'язок задачі стабілізації режиму КС (стабілізацію тиску на її виході) засобами локальної автоматики. Задачу стабілізації режиму КС автори вважають розв'язаною, якщо її вирішення можливе шляхом зміни безперервних керуючих параметрів (частоти обертання валів ВЦП) без зміни структури КС.

У загальному випадку, задачу оптимізації роботи компресорного цеху (КЦ) можна сформулювати як

$$J(P_{ax}, P_{aux}, T_{ax}, q_{КЦ}, t_a, P_a, s, n) = J(k, s, n) \rightarrow \min,$$

де  $k = (P_{ax}, P_{aux}, T_{ax}, q_{КЦ}, t_a, P_a)$  - вектор заданих параметрів режиму роботи КЦ.

Задача структурної оптимізації КЦ полягає у пошуку такої структури цеху  $s^*$ , вибір якої надавав би мінімум критерію  $J$ :

$$s^* = \arg \min J(k, s, n^*(k, s)),$$

де  $n^*(k, s)$  - вектор оптимальних значень частоти обертання вала ВЦП при заданій структурі  $s^*$ .

В роботі [81] задача оптимізації режиму роботи компресорного цеху розглядається як задача перерозподілу потоків газу між агрегатами з метою мінімізації витрат паливного газу, який споживається агрегатами. При цьому необхідно забезпечити виконання планового завдання на перекачування певної кількості газу при заданих тисках на вході та виході КЦ та заданій вхідній температурі. Вирішують задачу оптимізації, розглядаючи кожен агрегат індивідуально, із власними фактичними характеристиками, які в процесі експлуатації суттєво відхиляються від паспортних.

Регулюючи частоту обертання ВЦН, можна змінити об'ємні витрати, отже і потужність агрегату й витрати паливного газу. Таким чином, потрібно мінімізувати сумарні витрати паливного газу по цеху.

Метою оптимального керування паралельно працюючими нагнітачами, які мають різні приводи [23], є мінімізація затрат компримування газу. Автор розглядає три групи нагнітачів, які мають різні приводи. Перша група нагнітачів має електропривод з регульованою частотою обертання вала нагнітача. Дві інші групи – це нагнітачі з газотурбінним приводом. Регулювання частоти обертання вала нагнітачів здійснюється шляхом зміни подачі паливного газу в камеру згорання ГТУ. В кожній із трьох груп нагнітачі є однотипні.

Таку задачу оптимізації розглянуто як декомпозицію двох задач, що приводить до двоетапного способу розв'язання поставленої задачі. На першому етапі розв'язується задача вибору необхідної кількості агрегатів за умови, що буде забезпечена задана продуктивність компресорної станції і будуть досягнуті мінімальні затрати на їх експлуатацію.

На другому етапі вибирають режим роботи кожної із груп компресорів, забезпечивши необхідну продуктивність станції, обмеження на технологічні параметри та загальні мінімальні затрати на експлуатацію агрегатів.

Таким чином, аналіз тенденцій розвитку методів оптимального керування КС показує [23,39,82], що задача оптимізації вирішується як дворівнева. На верхньому рівні мінімізуються витрати на транспортування газу по мережі

газопроводів і розподілення газу між споживачами. На нижньому рівні ставиться задача оптимального розподілу навантаження між агрегатами компресорного цеху або компресорної станції з врахуванням газодинамічних процесів транспортування газу по трубній обв'язці КС і магістральним трубопроводам, що з'єднує сусідні КС. При цьому значна увага приділяється безпомпажному режиму роботи нагнітачів.

При такій постановці задачі за критерій оптимальності вибирають [23, 39] досягнення мінімуму витрати паливного газу або електроенергії, які необхідні для забезпечення заданого тиску або витрати газу в загальному колекторі на виході із компресорного цеху при одночасному виконанні різних вимог з безпечного функціонування обладнання КС.

Такий критерій має і екологічне значення, оскільки скорочує викиди продуктів спалювання природного газу в атмосферу.

Проте автор [23] вважає, що нагнітачі на КС однієї групи мають однакові технічні характеристики, і не враховує реальний технічний стан газоперекачувального обладнання.

Таким чином, і вітчизняній і в закордонній практиці транспортування природного газу використовуються критерії мінімуму споживання паливного газу або максимуму продуктивності. Для вирішення цих задач застосовуються методи нелінійного програмування, генетичні алгоритми та експертні системи які використовують дані SCADA систем. Проте, при цьому не враховується технічний стан нагнітачів.

#### **1.4. Аналіз методів ранжирування об'єктів за їх технічним станом**

Задача оптимізації режимів компресорних цехів нерозривно пов'язана із задачею експлуатації та обслуговування ГПА за фактичним технічним станом. На даний час ці задачі розглядаються, як правило, без взаємозв'язку, однак для досягнення економії паливного газу компресорним цехом їх потрібно вирішувати комплексно.

Ідентифікація та планування режимів роботи КС в процесі експлуатації здійснюється з використанням зведених характеристик ВІЩ, які характеризують поточний технічний стан агрегату. Зведені характеристики не завжди дають змогу точно оцінити об'ємну продуктивність та інші показники (політропний к.к.д., втрати потужності на компримування), що характеризують ефективність роботи нагнітачів, оскільки не враховують технічний стан, який погіршується в процесі їх експлуатації. Тому виникає необхідність ранжирування газоперекачувальних агрегатів в залежності від їх технічного стану. Така градація дозволить раціонально використовувати ресурси обладнання компресорних станцій.

Для оцінки стану і роботи ГПА важливе значення мають усі види діагностики, оскільки агрегати на КС безперервно працюють протягом 7200 - 11200 годин без зупинки. Саме у цих умовах важливо оцінити їх поточний стан і передбачити хід зміни основних характеристик (потужність, к.к.д.) на перспективу.

В умовах КС в даний час функціонує постійно діюча система виміру параметрів працюючих агрегатів, проте вона не забезпечує комплексну оцінку технічного стану агрегатів.

Слід зазначити, що стан агрегатів можна і доцільно оцінювати не тільки значеннями вимірюваних параметрів, такими як  $P$  і  $T$ , але і такими характеристиками, як шум, вібрація, стан моторної оливи, тощо.

При роботі газотурбінного агрегату всі його вузли і деталі здійснюють вимушені і резонансні коливання механічного і аеродинамічного походження, що викликає вібрацію двигуна. Залежно від конструктивного виконання ГТУ, її збірки і монтажу, умов експлуатації, вібрація елементів установки може бути різною. В деяких випадках вібрація може стати досить значною і привести до вимушеної зупинки агрегату.

Одним з основних напрямів технічної діагностики ГПА є метод параметричної діагностики. Основою методу параметричної діагностики є

визначення зміни параметрів технічного стану агрегату або його окремих елементів за зміною його технологічних і паливно-енергетичних показників - потужності, продуктивності, к.к.д. приводу і нагнітача в процесі експлуатації.

Енергетична ефективність  $W_e$  обладнання визначається мінімальними витратами енергії при технологічних процесах [83]. При виборі ГПА для оснащення КС за критеріями енергетичної ефективності необхідно виходити із умови досягнення необхідної корисної потужності, яка виробляється двигуном при мінімальній питомій витраті енергії. У табл. 1.1 наводяться результати розрахунку технічних характеристик трьох типів ГПА-16 - «Нева», «Урал» і «Волга» за визначенням критеріїв енергетичної ефективності порівнюваних агрегатів [83,84]. На підставі отриманих результатів проводиться вибір типу агрегату для оснащення КС.

Таблиця 1.1

## Технічна характеристика ГПА

Тип ГПА	ГПА-16 «НЕВА»	ГПА-16 «УРАЛ»	ГПА-16 «ВОЛГА»
Тип ГТУ	АЛ-31СТ	ПС-90-2	ПК-38СТ
Потужність на муфті нагнітача, МВт	16	16	16
Ефективний к.к.д. нагнітача	0,362	0,363	0,365
Ступінь підвищення тиску в ОК	19	25,6	25,9
Температура газу перед турбіною, К	1440	1395	1456
Температура газів на вихлопі, °С	488	460	443
Розхід робочого тіла, кг/с	57,4	70,5	54,6
Частота обертання силової турбіни, хв <sup>-1</sup>	5300	5500	5300
Комерційна продуктивність ГПА, млн м <sup>3</sup> /добу	33,1	33,0	32,7
Тиск газу на вході, МПа	7,45	7,45	7,45
Ступінь підвищення тиску в нагнітачі	1,44	1,44	1,44
Витрата паливного газу, кг/с	0,948	0,881	0,876
Витрата пускового газу, кг/с	1,0	2,0	0,8...1,3

У практиці експлуатації ГТС існує декілька підходів до вибору агрегатів.

Вибір по методу «Гипрогазцентр» (м. Нижній Повгород) заснований на порівнянні різних характеристик за паспортними даними агрегатів: потужності, к.к.д., по витраті палива, пускового газу, змащувального мастила.

Проводиться також порівняння агрегатів за мінімумом дисконтованих витрат агрегатів на КС (табл. 1.2).



Таблиця 1.2

## Ранжирування агрегатів за різними критеріями

Критерії порівняння		Тип ГПА	ГПА-16 «НЕВА»	ГПА-16 «УРАЛ»	ГПА-16 «ВОЛГА»
		Тип ГТУ	АЛ-31СТ	ПС-90-2	НК-38СТ
За паспортними даними					
Параметри потужності	N - ном. потужність, МВт		16	16	16
	$\varepsilon$ - ступінь підвищення тиску		1,44	1,44	1,44
	Q - витрата газу, млн. м <sup>3</sup> /добу		33,1	33,0	32,7
Ранжирування			1	1	1
Параметри ефективності	к.к.д. двигуна, %		36,2	36,3	36,5
	Витрата палива, кг/с		0,884	0,881	0,876
Ранжирування			3	2	1
Пусковий газ	Витрата, кг/с		1,0	2,0	0,8-1,3
	На 1 пуск, кг		90	400	150
Ранжирування			2	3	1
Масило	Об'єм заправки, м <sup>3</sup>		5	4,5	-
	Втрати, кг/год		0,7	0,5	-
Ранжирування			3	2	1
Термін експлуатації	Повний ресурс, тис.год		200	100(150)	100
Ранжирування			1	2	3
Сумарні бали			10	10	7
За параметрами енергетичної ефективності					
Степінь підвищення тиску			19	25,6	25,9
Ранжирування			1	2	3
За рівнем корисної потужності	Відн. потужн. ОК, %		60,9	68,2	61,2
	Відн. потужн. ГТУ, %		39,1	31,8	38,8
Ранжирування			1	3	2
За питомою витратою енергії	D, МВтгод/млн м <sup>3</sup>		11,600	11,640	11,743
Ранжирування			1	2	3
Підсумкове ранжирування, сумарні бали			3	7	8

Там же приводиться методика ранжирування агрегатів за трьома різними критеріями. Пропонується проводити порівняння агрегатів і вибір ГПА за розрахованими критеріями енергетичної ефективності.

Параметрична діагностика (за термогазодинамічними параметрами) широко застосовується при контролі стану проточної частини відцентрових машин, циліндро-поршневої групи і клапанів поршневих машин, негерметичності ущільнень, тощо. Як діагностичні ознаки використовуються параметри тиску і температури газу ступенів компресора, його продуктивність, температура охолоджуючої води в холодильниках, її витрата, струм, який споживається електродвигуном з мережі, тощо [85,86]. Результати цих вимірювань представляються на реєструючих пристроях центрального пульта управління цеху або на ЕОМ. На додаток до цих параметрів можуть вимірюватися температура підшипників, тиск масла, рівень вібрації [85,87].

Так, в роботі [88] розроблена методика діагностування відцентрових компресорів за газодинамічними параметрами, яка дозволяє в умовах експлуатації встановлювати якісний і кількісний вплив на характеристики ступеня експлуатаційних порушень в проточній частині, включаючи знос ущільнень, забруднення міжлопаткових каналів дифузора, забруднення теплообмінників і нещільності в їх проточній частині.

У МГТУ ім. Н.Е. Баумана створена автоматизована система контролю, що дозволяє контролювати до 60 параметрів, які змінюються повільно (температура, тиск, продуктивність, тощо) і до 10 швидкозмінних параметрів (індикаторна діаграма, переміщення запірних органів клапанів, тощо) поршневих компресорів [89]. Вона дозволяє вимірювати всю сукупність параметрів, що характеризують працездатність машини, в об'ємі, необхідному для проведення випробувань відповідно до ГОСТ 20073-81, ISO 1217.

На компресорних станціях в системі підготовки оливи до її використання в ГПА організовано очищення і контроль чистоти оливи. За наслідками контролю клас чистоти рідини вибирається з ГОСТ 17216-71 "Промислова чистота. Класи

чистоти рідин". Ефективним методом діагностування стану деталей є аналіз продуктів спрацювання в змащувальній оливі (трібодіагностика). Одними з основоположників цього методу є вчені РГУНГ ім. І.М. Губкіна. Серед всього різноманіття способів визначення концентрації продуктів у відпрацьованій оливі найбільшого поширення набули спектральні методи, що характеризуються високою точністю і чутливістю [85,90,91]. За допомогою аналізу проб оливи визначають концентрацію в ній того чи іншого елементу матеріалу, за величиною якої оцінюють усереднене спрацювання відповідної деталі. Недоліком методу є визначення сумарного спрацювання деталей, виготовлених з одних і тих же конструкційних матеріалів. Слід зазначити, що широкого розповсюдження в промисловості трібодіагностика поки що не отримала. Але є перспектива її застосування для оцінки працездатності підшипників кочення газоперекачувальних агрегатів (ГПА) [85,87].

Якщо оцінювати внесок кожного з методів у вивчення поточного стану ГПА [92], то велика частина дефектів і несправностей може бути встановлена методами вібродіагностики, придатними для виявлення дефектів практично всіх елементів агрегату. Близько 30% всіх несправностей ГПА і більшість дефектів проточної частини виявляється аналізом термогазодинамічних параметрів (параметрична діагностика) і близько 20% несправностей (в основному тільки пара тертя) реєструються за наслідками трібодіагностики. Причому достовірність діагнозу отриманого шляхом вібродіагностики може бути підтверджена або спростована тільки використанням параметричної діагностики.

Разом з традиційними методами діагностування техніко-економічного стану технологічного устаткування компресорної станції (параметричний, вібраційний, трібологічний) існують нетрадиційні методи діагностування працюючих газотурбінних установок (ГТУ), які мають перспективу в найближчому майбутньому. До найбільш перспективних методів діагностування стану ГПА можна віднести наступні [93]: тепловий метод; метод радіолокації; екологічний метод діагностування; лазерний метод діагностування.

*Екологічний метод діагностування.*

Основним технологічним пристроєм ГТУ є камера згорання, що генерує, шляхом спалювання паливного газу, теплову енергію, яка переходить в механічну роботу ГТУ. При низькій якості очищення повітря від механічних домішок, солей кальцію і натрію, паливного газу від домішок газового конденсату з важкими рідкими вуглеводнями, оксидів магнію, ванадію тощо, відбувається утворення з'єднань  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{NaVC}_3$ , які зумовлюють високотемпературну корозію деталей ГТУ.

У продуктах згорання відбувається підвищення концентрації:

- оксиду вуглецю  $\text{CO}$  до  $500 \text{ мг/м}^3$ , оксидів  $\text{NO}_x$  до  $500 \text{ мг/м}^3$ , залишків незгорілого метану  $\text{CH}_4$  і водяної пари до  $0,4 \%$ ;
- поява слідів з'єднання оксидів натрію  $\text{Na}$ , магнію  $\text{Mg}$ , ванадію  $\text{V}$ ;
- зростання концентрації металевих частинок конструктивних елементів гарячого тракту.

Проте оцінка динаміки зміни параметрів викидів за наслідками вимірювань продуктів згорання ускладнюється тим, що вміст оксидів азоту і вуглецю в газах залежить не тільки від технічного стану, але і від режиму роботи агрегату [94]. Для вирішення цього завдання запропонований комплексний показник - індекс концентрації  $K_p$ , що дозволяє визначати динаміку зміни вмісту оксидів азоту і вуглецю у вихлопних газах газоперекачувального агрегату на змінних режимах його роботи, незалежно від завантаження. Індекс концентрації  $K_p$  розраховується за формулою [94]:

$$K_p = \frac{C_{\text{NO}_x}}{C_{\text{NO}_x}^{\text{ном}}} + \frac{C_{\text{CO}}}{C_{\text{CO}}^{\text{ном}}},$$

$C_{\text{NO}_x}$ ,  $C_{\text{CO}}$  - концентрації оксидів азоту та вуглецю, відповідно, у вихлопних газах,  $\text{мг/м}^3$ , зведені до умовної концентрації кисню  $15 \%$ ;

$C_{\text{NO}_x}^{\text{ном}}$  - номінальна зведена концентрація оксидів азоту,  $\text{мг/м}^3$ ;

$C_{\text{CO}}^{\text{ном}}$  - номінальна зведена концентрація оксиду вуглецю,  $\text{мг/м}^3$ .

В результаті реалізації даного методу отримана аналітична залежність коефіцієнта технічного стану ГПА за потужністю  $K_N$  від температури газу за ТНТ  $T_{ТНТ}$  та індексу концентрації  $K_p$ , що кількісно характеризує викиди оксидів азоту та вуглецю:

$$K_{N_c}(K_p, T_{ТНТ}) = (-0.46 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ТНТ}^2 + 0.059 \cdot T_{ТНТ} - 17.65) \times \\ \times (0.77 \cdot e^{-0.28 \cdot K_p} - 1.08 \cdot e^{-0.21 \cdot K_p}) + 1.08 \cdot e^{-0.21 \cdot K_p}.$$

Система, запропонована в роботі [95] призначена для вибору і ранжирування об'єктів будь-якої предметної області (ПО). Універсальність системи зумовлена широким спектром реалізованих в ній функцій вибору і ранжирування. Вони об'єднані в наступні групи методів багатокритеріальної оцінки об'єктів.

*Методи вибору* [96]: знаходження не домінуючих об'єктів (метод Парето); знаходження допустимої множини.

*Методи ранжирування об'єктів* [97]: метод пріоритетів; метод суперкритерію без обмежень; метод бальної оцінки.

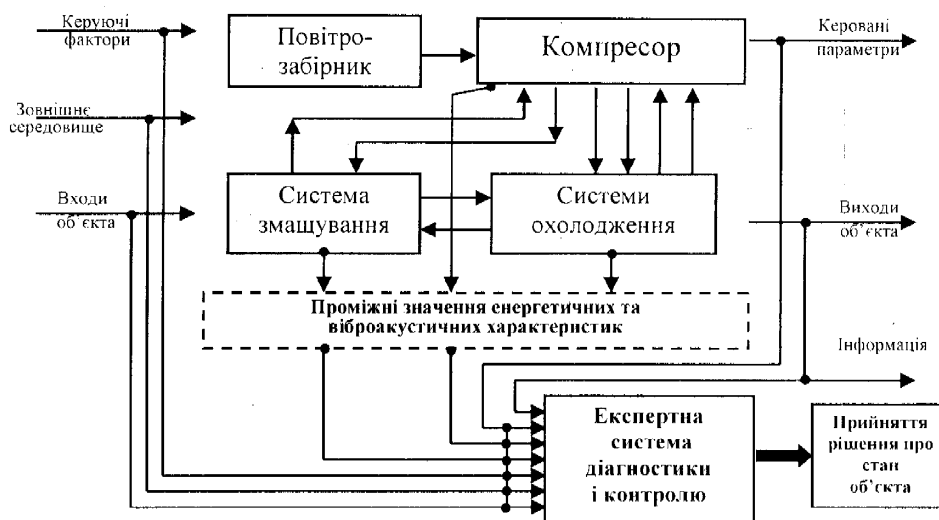
*Методи вибору і ранжирування об'єктів*: метод умовної оптимізації; метод Парето з оцінкою; метод пошуку допустимої множини з оцінкою.

У аналітичних методах діагностування використовуються також роботи зі створення автоматичних систем штучного інтелекту у вигляді нейрокомп'ютерів, нейромереж [98], застосовуються інформаційні технології, орієнтовані на використання нечітких множин.

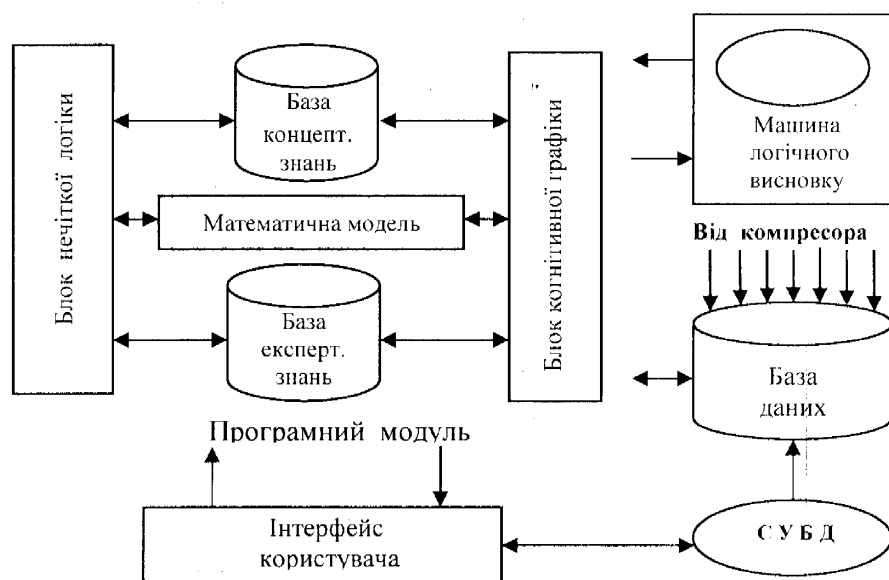
Діагностування і екологічний моніторинг устаткування ефективно можуть здійснюватися в процесі експлуатації. Розроблені методика і схема комплексної діагностики (рис. 1.3), в яких використана експертна система оцінки технічного стану, параметрів роботи і контролю віброакустичних характеристик компресора.

Експертна система як програмний комплекс, а саме Tilshell 3.0+, дозволяє на основі закладених в ньому знань (досвіду) експерта дати інтелектуальну

пораду або ухвалити рішення. Структурна схема нечіткої гнучкої експертної системи (рис. 1.4) включає: блок нечіткої логіки, математичну модель, блок когнітивної графіки, базу концептуальних знань, базу експертних знань.



**Рис. 1.3. Схема комплексної діагностики технічного стану компресорної установки з використанням експертної системи**



**Рис. 1.4. Структурна схема експертної системи Tilshell 3.0+ для діагностики технічного стану компресора**

На підставі вивчення науково-технічного досвіду в області діагностики нагнітачів природного газу, результатів експериментальних робіт, як розрахункові діагностичні параметри, що характеризують технічний стан газоповітряного тракту, для математичної моделі, згідно методів визначення значущості, були вибрані наступні основні формальні критерії [99]: політропний к.к.д.; коефіцієнт потужності; коефіцієнт напору; ступінь підвищення тиску газу.

Останнім часом спостерігається інтенсивний розвиток експертних систем за рахунок створення надійних і швидких алгоритмів пошуку несправностей. Як методологічна основа використовується логічний аналіз причинно-наслідкових зв'язків [90]. Є також роботи із створення автоматичних систем штучного інтелекту у вигляді нейрокомп'ютерів, нейромереж. Але зараз переважаючими є інформаційні технології, орієнтовані на використання нечітких множин, які реалізуються на базі традиційної обчислювальної архітектури [100].

У статті [101] пропонується метод інтелектуальної діагностики несправностей, який використовує як знання експертів та операторів, так і дані з різноманітних датчиків в реальному масштабі часу [102]. В цьому методі використана нечітка логіка [103]. Автоматизований інструмент запропонованої методології розроблений на платформі оболонки експерта G2 [104], що використовує компоненти GDA (G2 Діагностичний Помічник). Робота методології перевірена з використанням технологічних та модельованих даних.

Таким чином, оптимальне керування процесом компримування природного газу призначене для підтримання продуктивності КС при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами на основі фактичних характеристик ВЦН. Тут під оптимальним розподілом мається на увазі таке завантаження агрегатів, яке забезпечує мінімум енерговитрат на компримування газу при виконанні ряду обмежень зі сторони всмоктування і нагнітання, та з врахуванням впливу навколишнього середовища. При цьому ступінь завантаження кожного ГПА залежатиме від його реального технічного стану. Технічний стан обладнання визначається за результатами діагностування.

## 1.5. Обґрунтування і вибір напрямку досліджень

Системи трубопровідного транспорту газу є досить великими споживачами газу за рахунок власних потреб, технологічних і випадкових витрат. Витрати газу на власні потреби на компресорних станціях газотранспортної системи України за різними оцінками становлять до 3% від обсягу транспортованого газу. Зменшення цих витрат є важливим напрямом енергозбереження, має суттєвий економічний ефект. Економія газу може бути отримана за рахунок як удосконалення технічного рівня устаткування газопроводів, так і вибору такого режиму роботи компресорних цехів, який забезпечує мінімальні витрати газу на власні потреби.

Таким чином, головною задачею системи оптимального керування компресорним цехом (КЦ) є підтримання продуктивності КС при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами і технологічними об'єктами, за якого сумарні витрати на експлуатацію групи паралельно включених ГПА з відцентровими нагнітачами мали б мінімальне значення з врахуванням впливів зовнішнього середовища та обмежень на технологічні параметри.

Проте, однією з серйозних проблем, що виникають у процесі розробки сучасних методів керування магістральними газопроводами, є нестабільність робочих газодинамічних характеристик відцентрових нагнітачів компресорних станцій, які залежать від умов експлуатації, технічного стану нагнітачів, тощо. Відсутність даних про втрати та погіршення характеристик ВЦН не дає можливості вирішувати завдання автоматичного регулювання режимів роботи газоперекачувального обладнання та оптимального керування компресорними станціями, а також визначити ефективність процесу транспортування газу. У той самий час наявні ресурси обчислювальної техніки дають змогу в режимі реального часу виконувати розрахунки, необхідні для визначення фактичних функціональних параметрів режиму роботи ГПА на основі накопиченої інформації від давачів штатної автоматики.



Виходячи із вищесказаного, поставлено мету розроблення та інтеграції до складу розроблених та експлуатованих САК ГПА і АСК КЦ підсистеми оптимального керування ГПА з врахуванням їх технічного стану.

У відповідності до поставленої мети, задачами дослідження є:

1. Проаналізувати існуючі методи і засоби оптимального керування процесом компримування природного газу.
2. Розробити метод ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом.
3. Побудувати адекватні процесу компримування природного газу математичні моделі.
4. Розвинути спосіб розв'язку задачі оптимізації роботи паралельно працюючих агрегатів з врахуванням їх технічного стану, обмежень на технологічні параметри та впливу навколишнього середовища для економії паливного газу.
5. На основі отриманих емпіричних моделей, алгоритмів ранжирування та оптимізації розробити систему оптимального керування процесом компримування природного газу та її програмне забезпечення.
6. Розроблені алгоритми і програми адаптувати для промислового використання в системах контролю і керування процесом компримування природного газу.
7. Випробувати розроблену комп'ютерну систему оптимального керування у виробничих умовах та оцінити очікуваний економічний ефект від її використання.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ОБ'ЄКТІ

#### 2.1 Характеристика компресорної станції як об'єкта оптимального керування

Газотранспортна система України є однією з найбільших в Європі, посідає за обсягом транзиту перше місце у світі. Розвинута система газопроводів, яка пов'язана з газотранспортними системами сусідніх держав визначає її важливу роль у транзиті природного газу.

В системі газопостачання провідну роль відіграє УМГ "Прикарпаттрансгаз", яке в своєму складі має 18 компресорних станцій (119 газоперекачувальних агрегатів) загальною продуктивністю 203,98 млн.ст.м<sup>3</sup>/год. Воно містить такі основні підрозділи:

1. Долинське лінійно-виробниче управління магістральних газопроводів (ДЛВУМГ), створене в 1966 році;
2. Закарпатське лінійно-виробниче управління магістральних газопроводів (ЗЛВУМГ), створене в 1967 році;
3. Хустське лінійно-виробниче управління магістральних газопроводів (ХЛВУМГ), створене в 1978 році;
4. Богородчанське лінійно-виробниче управління магістральних газопроводів (БЛВУМГ), створене в 1985 році;
5. Одеське лінійно-виробниче управління магістральних газопроводів (ОЛВУМГ), створене в 1994 році;

Як приклад розглянемо Долинське лінійне виробниче управління магістральних газопроводів, де у 2003 році була введена в експлуатацію сучасна компресорна станція КС-3. Газ, що проходить технологічну обробку і підготовку для подальшого транспортування до споживача, на підприємство надходить із п'яти магістральних газопроводів - "Івацевичі-Долина-2", "Івацевичі-Долина-3",

"Торжок-Долина", "Київ-Захід-Україна-2", "Більче-Волиця-Долина". На обслуговуванні Долинського ЛВУМГ - понад 630 км магістральних газопроводів. Тут нині обробляється і транспортується 20 млрд. кубічних метрів газу на рік, що становить 15 відсотків від загального експорту природного газу.

Основним елементом КС є ГПА. Кожний ГПА конструктивно складається із привода і нагнітача (компресора). Приводами нагнітачів, які встановлені на Долинській КС, є газотурбінні установки (ГТУ).

Основні параметри ГПА, які встановлені на КС-3 містить табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Основні параметри газоперекачувальних агрегатів типу ГП16С**

Назва показників	Одиниці виміру	Значення
Назва КС	-	КС-3
Тип приводу	-	ДГ-90Л2
Кількість нагнітачів	шт.	5
Завод-виготовлювач	-	ВАТ «СМІВО ім. Фрунзе»
Продуктивність при 20 <sup>0</sup> С і 760 мм. рт. ст.	млн. м <sup>3</sup> добу	32,4
Тиск газу на вході	МПа	5,16
Тиск газу на виході	МПа	7,5
Ступінь підвищення тиску	-	1,44
Температура газу на вході в нагнітач	<sup>0</sup> С	20 <sup>0</sup> С±10 <sup>0</sup> С
Температура газу на виході з нагнітача	<sup>0</sup> С	40-80 <sup>0</sup> С
Ступенів стиснення	шт.	2

Серед способів регулювання продуктивності КС слід відмітити [105, 106] байпасування, включення-виключення агрегатів, закручування течії газу на вході ВЦН за допомогою вхідного направляючого апарату (ВНА), дроселювання та зміна частоти обертання ротора силової турбіни.

Байпасування не приводить до зменшення потужності компресора, але зменшує питому потужність компресора, оскільки байпасування приводить до зменшення продуктивності газопроводу.

Включення-виключення компресорів, як і при регулюванні зміною частоти обертання ротора силової турбіни, є досить ефективним. Але безперервне включення-виключення не допустиме для ГПА і запірної арматури, оскільки це приводить до їх швидкого зношення.

Регулювання продуктивності ВЦН шляхом закручування течії газу можна здійснювати двома способами: за течією і проти течії. В обох випадках змінюється напір [105]. Закручування течії в сторону течії зменшує напір ВЦН, а закручування течії в зворотну сторону – збільшує напір ВЦН.

Співставлення режимів керування за допомогою дроселювання на вході і закручуванням течії перед входом ВЦН показує, що втрати в питомій потужності доходять до 20% [105].

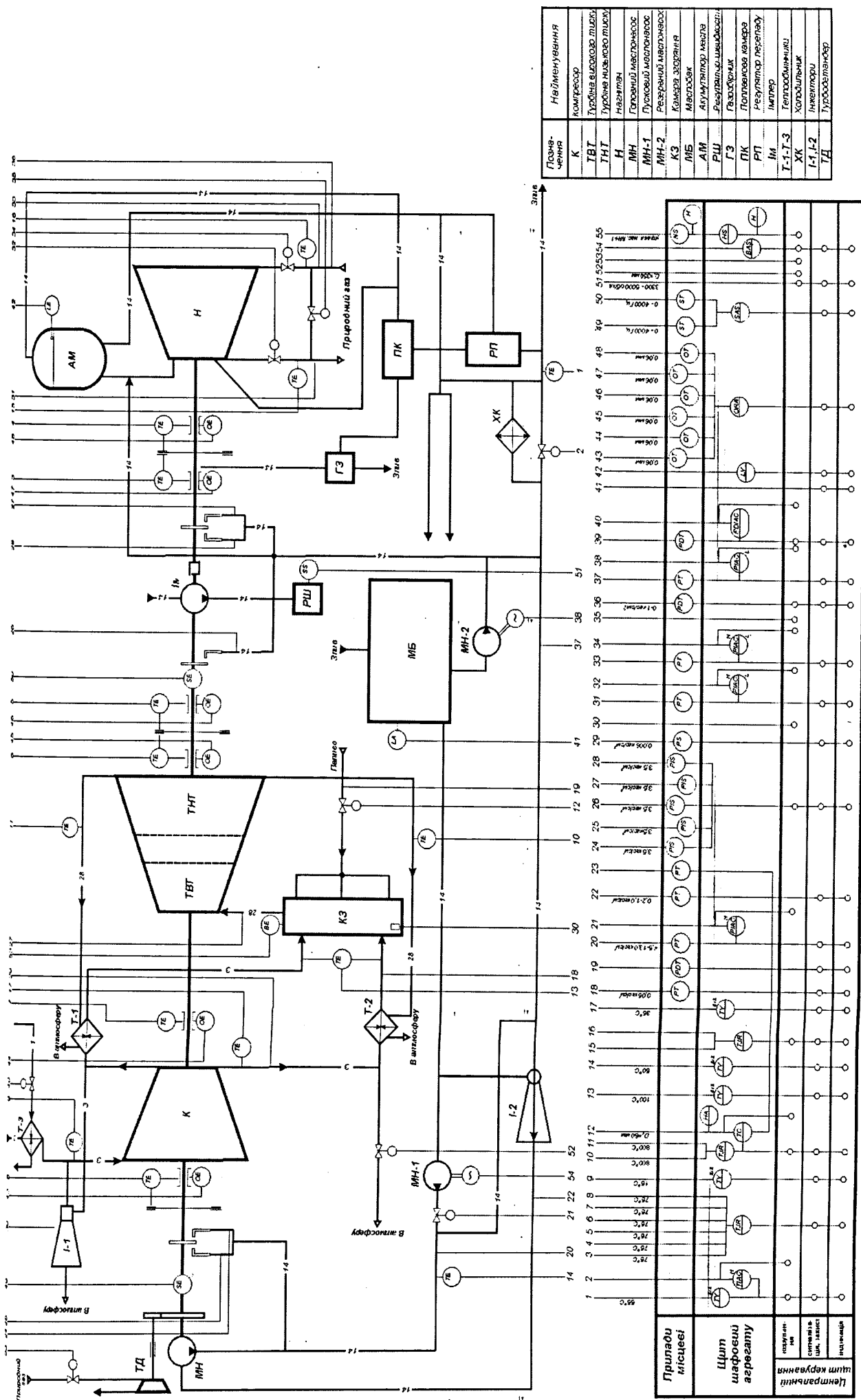
Регулювання витрати газу через компресор за допомогою зміни кількості обертів відцентрового нагнітача є найбільш практичним і економічним [107].

КС і лінійна ділянка газопроводу утворюють єдину динамічну систему. Але при оптимізації роботи КС недоцільно враховувати нестационарність течії газу тому, що перехідні процеси тут закінчуються значно швидше ніж на лінійних ділянках. Зміна витрати на вході і виході ВЦН відбувається практично синхронно.

## **2.2. Умови та методика проведення експериментальних досліджень**

Основною задачею досліджень було отримання експериментального матеріалу для побудови моделей компресорної станції.

Вимірювання і реєстрація технологічних параметрів нагнітача здійснювалось за допомогою штатних технічних засобів, якими оснащена компресорна станція КС- 3. На рис. 2.1 показана схема ГПА з приладами, які використовувались для вимірювання таких параметрів, як тиск і температури на вході та виході ВЦН, частота обертання вала нагнітача, перепад тиску на конфузори, тощо. В табл. 2.2 приведені основні характеристики деяких приладів.



Позначення	Найменування
К	Компресор
ТВТ	Турбіна високого тиску
ТНТ	Турбіна низького тиску
Н	Надзатяг
МН-1	Газовий насос
МН-2	Газовий насос
КЗ	Колонна зборівки
ІМБ	Інтермедіатна будова
АМ	Акумулятор масла
ПУ	Пристрій кордажу
ГЗ	Газовий задавальник
РП	Регулятор тиску
ІМ	Індикатор
Т-1-Т-3	Температурний перетворювач
ХК	Хімікатив
І-1, І-2	Індикатори
ТД	Турбодвигун

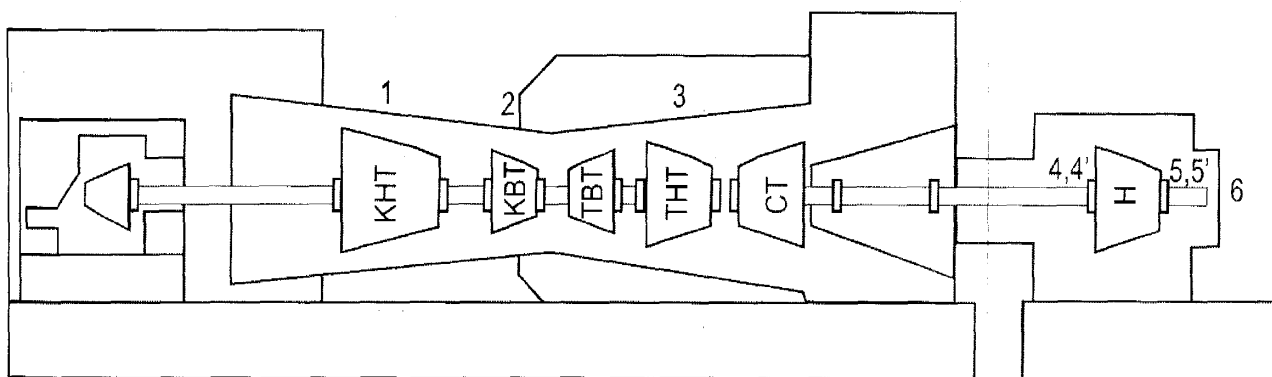
Рис. 2.1. Схема ГПА із вимірювальними приладами

Таблиця 2.2

**Основні характеристики приладів, використаних при проведенні експериментальних досліджень на КС – 3 Долинського ЛВУ**

Назва вимірюваного параметру	Тип приладу	Діапазон вимірювань	Клас точності
Тиск газу на вході ВЦН	Давачі фірми Honeywell - STG97L-F1G	0-100 кг/см <sup>2</sup>	0,1
Тиск газу на виході ВЦН	Давачі фірми Honeywell - STG97L-F1G	0-100 кг/см <sup>2</sup>	0,1
Температура газу на вході ВЦН	ТСП-1187	0-150°С	0,5
Температура газу на виході ВЦН	ТСП-1187	0-150°С	0,5
Кількість обертів валу ВЦН	ДТН-240	0-8000 об/хв	0,5
Температура газу на виході ТНТ	ТСП-1187	0-550°С	0,5
Перепад тиску на конфузорі	Давачі фірми Honeywell - STD120	0-1кг/см <sup>2</sup>	0,1

Розташування точок контролю віброшвидкості (1,2,3) та вібропереміщення (4,4', 5-5') показано на рис. 2.2 Вібропереміщення вимірюється відносно вертикалі (4, 5) та горизонталі (4', 5'). В табл. 2.3 приведені основні характеристики приладів, при цьому використовувались.



- 1 – фланець корпусу КНТ,
- 2 – фланець корпусу КВТ,
- 3 – фланець корпусу ТНТ,
- 4,4' – передній опорний підшипник ВЦН,
- 5,5' – задній опорний підшипник ВЦН.

**Рис. 2.2 Точки підключення приладів для вібраційного контролю**

Таблиця 2.3

**Характеристика приладів, які використовувались при проведенні експериментальних досліджень**

Назва вимірюваного параметру	Давач	Перетворювач	Діапазон вимірювань
Віброшвидкість, мм/с	SA6350	SC5535/45	0-50 мм/с
Вібропереміщення, мкм	Metrix 10003	5465E-004	0-250 мкм
Осьовий зсув, мм	Metrix 10003	5488-001	0,5-2,0 мм

Аналіз проб оливи в картері та відкладень у фільтрах виконується у лабораторії два рази на місяць з метою визначення наявної кількості продуктів спрацювання деталей, які змащуються оливою, забруднень та домішок, що потрапляють в оливу ззовні, а також елементів, які входять до її складу.

Приводом ВЦН є ГТУ з керованою частотою обертання вихідного валу, яка змінюється відповідно до режиму роботи агрегату. Нижня границя частоти обертання  $n_{min}$  вибирається з умов безпомпажної роботи ВЦН, а верхня межа  $n_{max}$  обмежується граничною температурою продуктів згоряння на виході камери згоряння ГТУ.

Існує два способи одержання необхідного матеріалу для побудови математичних моделей нагнітачів – активні і пасивні експерименти [23].

Активний експеримент передбачає, що на вхід досліджуваного об'єкта подаються впливи за певним планом. Така постановка експерименту дає можливість скоротити об'єм експериментального дослідження і отримати математичну модель з мінімальною можливою похибкою.

Слід відмітити, що реалізація активного експерименту передбачає втручання в нормальний хід технологічного процесу. Проте ряд параметрів, таких як тиск та температура газу на входів в нагнітач ( $P_{г.в.}$ ,  $T_{г.в.}$ ), які задаються режимом роботи попередньої КС, та температура  $T_a$  і тиск  $P_a$  навколишнього середовища, неможливо змінювати в бажаному напрямку.

Таким чином, розумною альтернативою є використання природних змін

технологічних параметрів процесу компримування природного газу з метою отримання матеріалу для побудови математичної моделі нагнітача.

Сучасна система автоматизованого збору інформації про процес компримування газу на Долинській КС забезпечує архівування результатів вимірювання за тривалий проміжок часу усіх контрольованих параметрів. Приклад сформованої бази даних, показаний у вигляді фрагменту Excel – таблиці (таб. 2.4).

Таблиця 2.4

## Фрагмент Excel-таблиці параметрів роботи КС

Дата	№	Параметри						
		ГПА №2						
		Р газу на вході (кг/см <sup>2</sup> )	Р газу на виході (кг/см <sup>2</sup> )	Т газу на вході	Т газу на виході	Т-ра вихлопних газів	Продуктивність нагнітача (м <sup>3</sup> /с)	Частота обертання валу ВЦН
30.03.2004 15:46:01	1	32.07	38.19	7.1	14.6	443.37	79.226	3737
30.03.2004 15:46:02	2	32.07	38.19	7.1	14.7	443.43	79.183	3731
30.03.2004 15:46:03	3	32.07	38.19	7.1	14.8	443.48	79.139	3727.5
30.03.2004 15:46:04	4	32.07	38.19	7.1	14.9	443.53	79.096	3724
30.03.2004 15:46:05	5	32.07	38.19	7.1	15	443.58	79.053	3721
30.03.2004 15:46:06	6	32.07	38.19	7.1	15.1	443.63	79.01	3720.2
30.03.2004 15:46:07	7	32.07	38.19	7.1	15.2	443.69	78.967	3719.5
30.03.2004 15:46:08	8	32.07	38.19	7.1	15.286	443.74	78.967	3718.7
30.03.2004 15:46:09	9	32.07	38.19	7.1	15.371	443.79	78.967	3718
30.03.2004 15:46:10	10	32.07	38.19	7.1	15.457	443.84	78.967	3717.2
30.03.2004 15:46:11	11	32.07	38.19	7.1	15.543	443.9	78.967	3716.5
30.03.2004 15:46:12	12	32.07	38.19	7.1	15.629	443.95	78.967	3715.7
30.03.2004 15:46:13	13	32.07	38.19	7.1	15.714	444	78.967	3715

Програма досліджень передбачала отримання даних для побудови математичної моделі компресорної станції та визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів. Виходячи із проведеного аналізу літературних джерел, основними параметрами, які визначають стан ГПА є наступні [23]: продуктивність нагнітача  $Q$ , витрата паливного газу  $G$ , тиск  $P_{вх}$  і температура  $T_{вх}$  газу на вході, й тиск  $P_{вих}$  і температура  $T_{вих}$  газу на виході КС, температура  $T_{вих.г}$  продуктів згоряння на виході із турбіни низького тиску (ТНТ), частота обертання валу нагнітача  $n$ , температура  $T_a$  та тиск  $P_a$  навколишнього середовища. Для визначення технічного стану нагнітачів необхідні значення таких параметрів, як



віброшвидкість та віброприскорення, швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі, тощо.

Як було сказано вище, існуючі системи автоматизованого збору інформації про процес компримування газу забезпечують архівування результатів вимірювання за тривалий проміжок часу. Проте запис в базу даних здійснює при зміні поточного значення параметру. Як видно із таблиці 2.4 найчастіше змінюється значення частоти обертання валу нагнітача (через кілька секунд, або і щосекунди). Інші параметри змінюються з меншою частотою. Тому архіви мають різний об'єм і не придатні для побудови математичної моделі. В зв'язку з цим виникає ряд технічних задач, які необхідно розв'язати, щоб отримати адекватну модель процесу:

- перш за все, потрібно, щоб архіви містили інформацію за однакові проміжки часу і однакову кількість записів. Найбільша частота зміни у параметра - "частота обертання", тому доцільно формувати базу даних відповідно до часу зміни цього параметру (табл. 2.4). Проте такі архіви будуть містити надто багато даних (тільки за одну добу їх буде  $3600 \times 24 \times L = 86400 \times L$ , де  $L$  – кількість параметрів), і вони потребуватимуть багато часу для обробки. Тому виникає інша задача:

- визначити необхідне число точок контролю і частоту вимірювання фізичних параметрів, які визначають режим роботи нагнітача. Тобто, визначити час дискретизації  $\tau$ .

За можливістю відновлення інформації за результатами вимірювань способи дискретизації можна розділити на зворотні та незворотні [108].

Зворотні способи дають можливість відтворити сигнал за результатами дискретизації із заданою точністю.

Незворотні способи використовують для визначення статистичних характеристик сигналів. При цьому відновити початковий сигнал за сукупністю його початкових значень неможливо.

У зворотних способах дискретизації використовують такі критерії:

- *Дискретизація за частотним критерієм.* Правило вибору граничного кроку при рівномірній дискретизації з використанням моделі сигналу з обмеженим спектром найбільш чітко сформульовано і доведено В. А. Котельниковим у вигляді теореми, яка встановлює принципову можливість повного відновлення детермінованої функції з обмеженим спектром за її відліками і вказує граничне значення інтервалу часу між відліками, при якій таке відновлення ще можливе. Вона формулюється таким чином: функція  $u(t)$ , що допускає перетворення Фур'є і, що має безперервний спектр, обмежений смугою частот від 0 до  $F_c = \omega_c / (2\pi)$ , повністю визначається дискретним рядом своїх миттєвих значень, відлічених через інтервали часу

$$\tau = \frac{1}{2F_c},$$

де  $F_c$  - частота зрізу спектру сигналу, Гц.

Фізична суть теореми виявляється при розгляді зв'язку між формою функції і шириною її спектру. Тільки у разі, коли спектр функції безмежний, її значення в близькі моменти часу можуть змінюватися довільно (кореляційний зв'язок між ними відсутній). Скорочення високочастотної частини спектру до граничної частоти  $\omega_1$  рівнозначне усуненню з тимчасової функції викидів, які могли бути сформовані цими високочастотними складовими (рис. 2.3 а). При менших граничних частотах  $\omega_2$  (рис. 2.3 б) і  $\omega_3$  (рис. 2.3 в) маємо більш згладжені функції часу. Оскільки значення цих функцій в моменти часу  $u(t_1)$  і  $u(t_1 + \Delta t)$  в межах деякого інтервалу  $\Delta t$  не можуть змінюватися істотно, можна обмежитися значеннями функції, узятими через інтервали  $\Delta t$ .

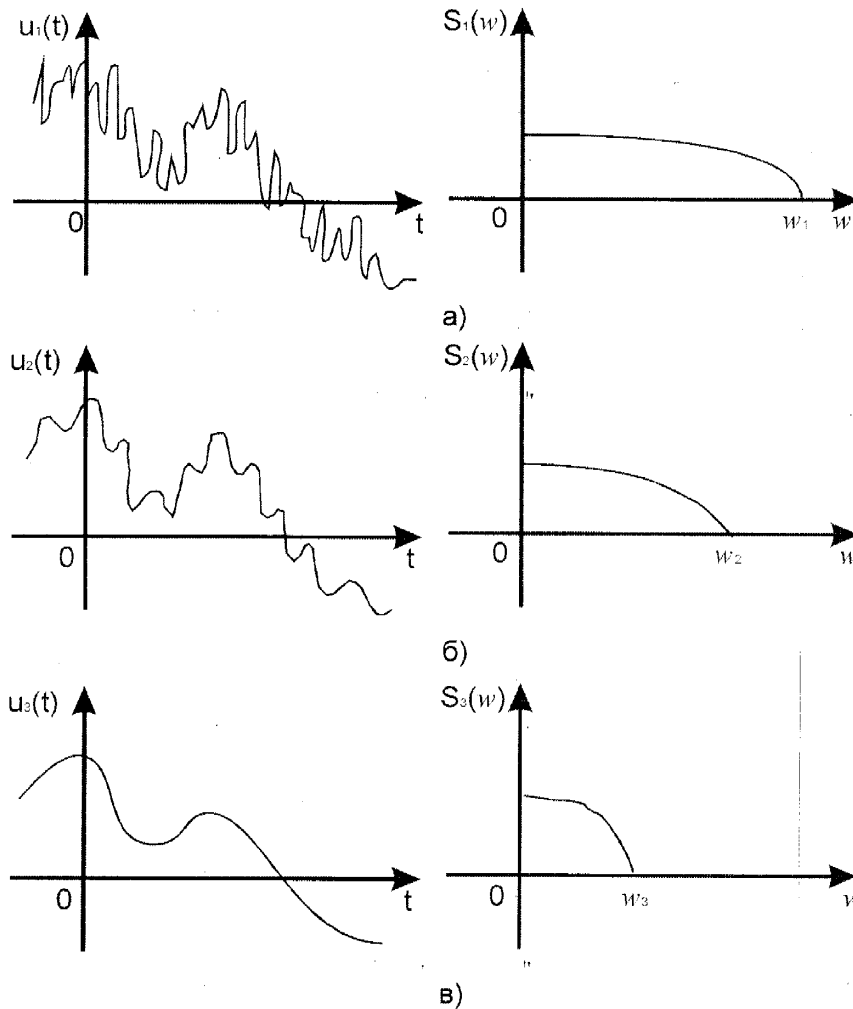
- *За кількістю похідних, які має процес в точках вимірювання.* В загальному випадку, коли вимірювальна величина має  $n+1$  похідну, крок дискретизації обчислюється за формулою [109]:

$$\tau = \sqrt[n+1]{\frac{C \varepsilon_e}{|x_{\max}^{(n+1)}(t)|}},$$

де,  $C$  - постійна величина, яка залежить від способу відновлення (екстраполяція чи інтерполяція);

$x_{\max}^{(n+1)}(t)$  - максимальне значення  $n+1$  похідної величини  $x(t)$ ;

$e_n$  - похибка відновлення.



**Рис. 2.3 Зв'язок між формою функції та шириною її спектру**

- За значенням автокореляційної функції.

Нехай маємо функцію  $x(t)$  дискретизовану через інтервал часу  $\tau$ , зображену на рис 2.4

З рисунка видно, що помилка дискретизації рівна

$$e(t) = x(t) - x(t + \tau).$$

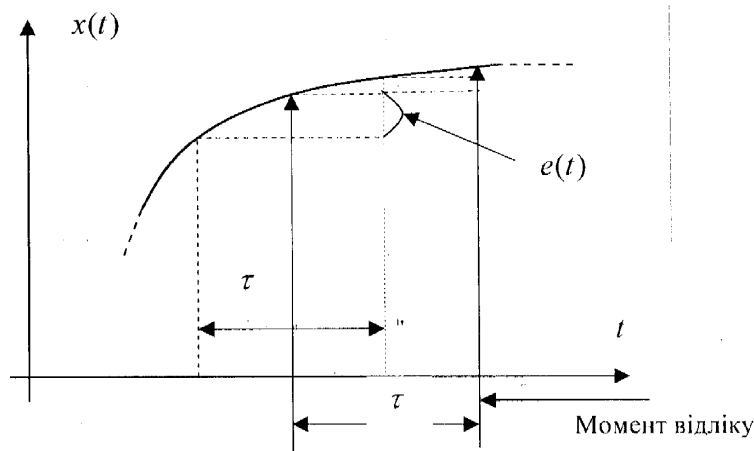


Рис. 2.4 Дискретизація неперервної функції

Дисперсія цієї помилки рівна

$$D_e = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [e(t)]^2 dt = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [x(t) - x(t + \tau)]^2 dt = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [x(t)]^2 dt +$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [x(t + \tau)]^2 dt - 2 \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [x(t)x(t + \tau)] dt.$$

Але

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [x(t)]^2 dt = R_x(0),$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [x(t + \tau)]^2 dt = R_x(0),$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [x(t)x(t + \tau)] dt = R_x(\tau),$$

де  $R_x(0) = E$  - енергія сигналу  $x(t)$ ;

$R_x(\tau)$  - автокореляційна функція сигналу  $x(t)$ .

Тоді, якщо  $x(t)$  - стаціонарний сигнал, він однорідний у часі і його характеристики від нього не залежать, отримуємо [110]:

$$D_e = 2R_x(0) - 2R_x(\tau),$$

або

$$\sigma_e = \sqrt{D_e} = \sqrt{2(R_x(0) - R_x(\tau))}, \quad (2.1)$$

де,  $\sigma_e$  - допустиме значення середньоквадратичного відхилення.

Середньоквадратичне відхилення для стаціонарного процесу визначається за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{Y-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^Y (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.2)$$

де  $Y$  - кількість точок вимірювання сигналу;

$x_i$  - значення сигналу в  $i$ -й точці вимірювання;

$\bar{x} = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y x_i$  - математичне очікування;

Для сигналу "Частота обертання валу нагнітача", зображеного на рис 2.5 розрахуємо значення середньоквадратичного відхилення. Автокореляційна функція цього сигналу зображена на рис. 2.6

Підставивши значення у формулу 2.2. Отримаємо:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{10000-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{10000} (x_i - 5034)^2} \approx 1.57 \cdot 10^3 \text{ об}^{-1}.$$

Тоді, для допустимого середньоквадратичного відхилення приймемо значення  $\sigma_0 = 1.5 \cdot 10^3 \text{ об}^{-1}$ , і розв'язавши рівняння (2.1) відносно  $\tau$  при відомому  $\sigma_0$ , отримаємо значення кроку дискретизації  $\tau = 20 \text{ с}$ .

На рис. 2.7 зображено початковий  $n(t)$  та відновлений дискретний  $n(kT)$  сигнали.

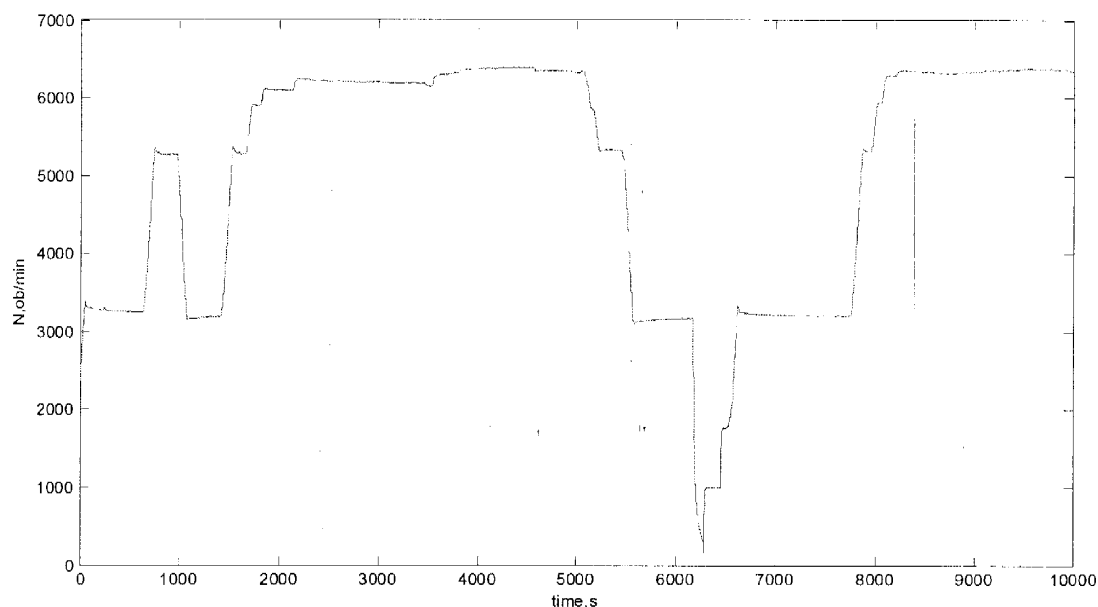
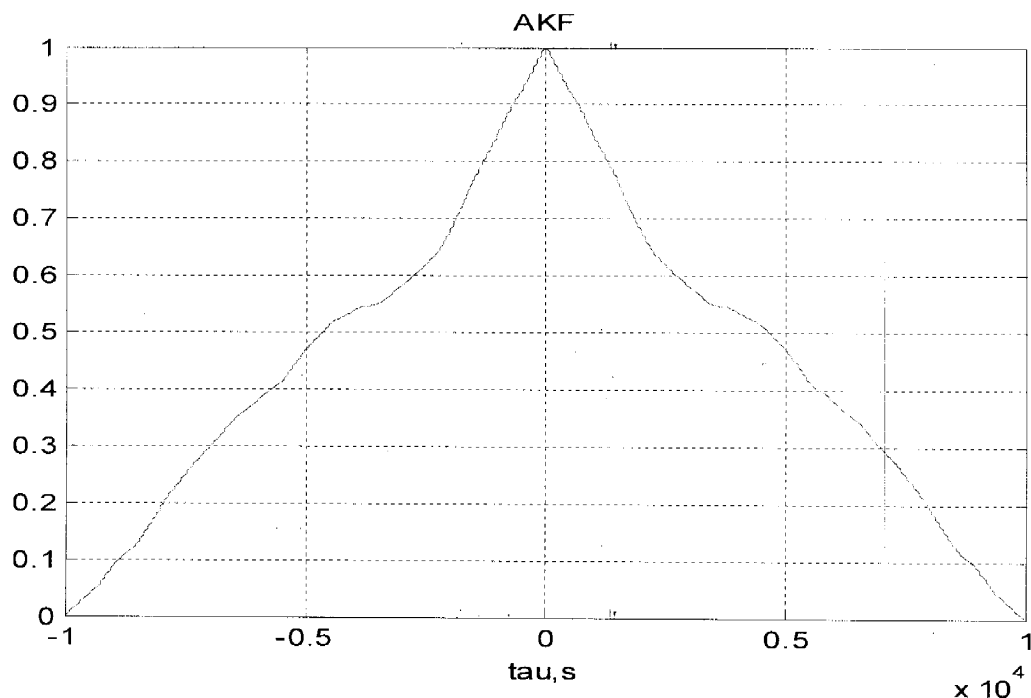
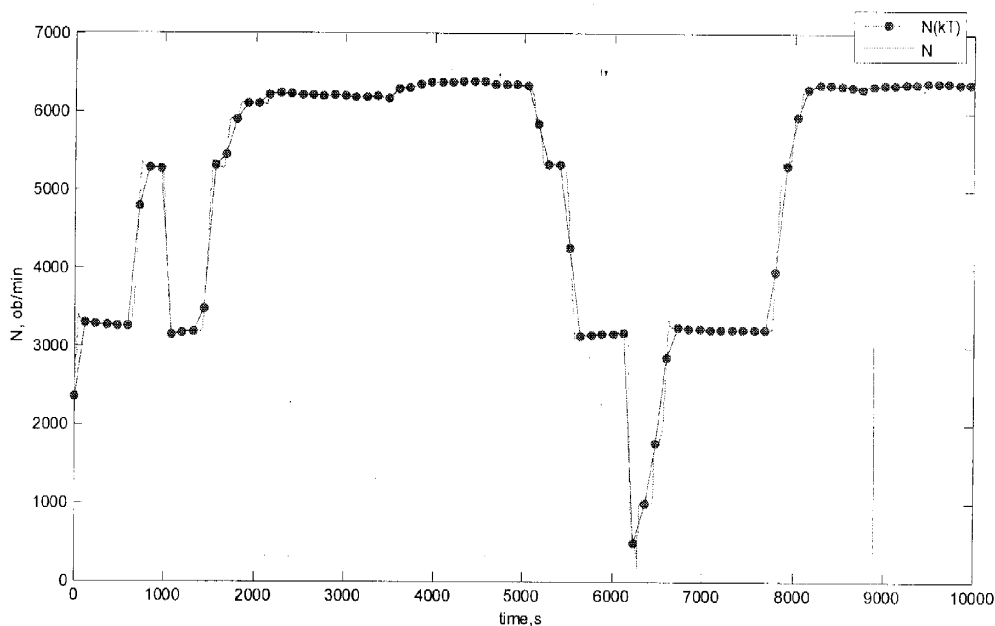


Рис. 2.5 Неперервний сигнал - "частота обертання валу нагнітача"



**Рис. 2.6 Автореляційна функція сигналу "частота обертання валу нагнітача"**

Побудувавши спектри цих сигналів (рис. 2.8-2.9), видно що умова теореми Котельникова виконується для обох сигналів. З цього можна зробити висновок, що крок дискретизації вибрано правильно і за дискретним сигналом можна буде відтворити сигнал за результатами дискретизації із заданою точністю.



**Рис. 2.7. Відновлення форми сигналу "частота обертання валу нагнітача" за дискретними даними**

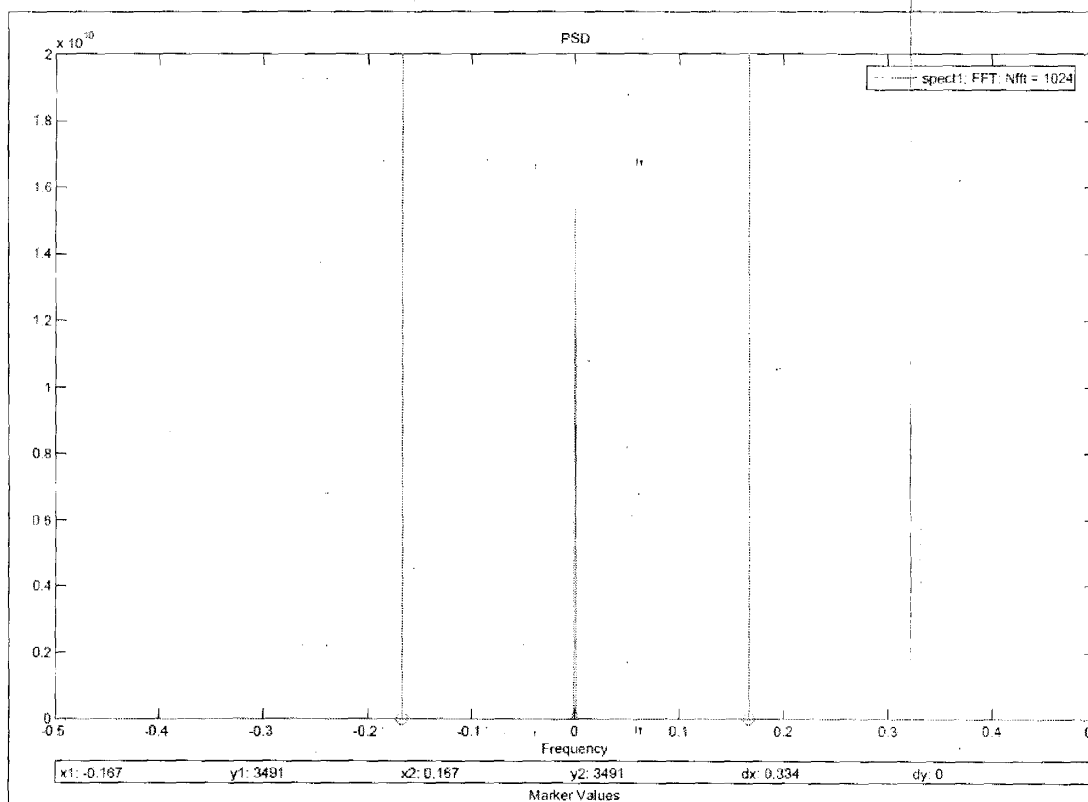


Рис. 2.8. Спектр початкового сигналу "частота обертання валу нагнітача"

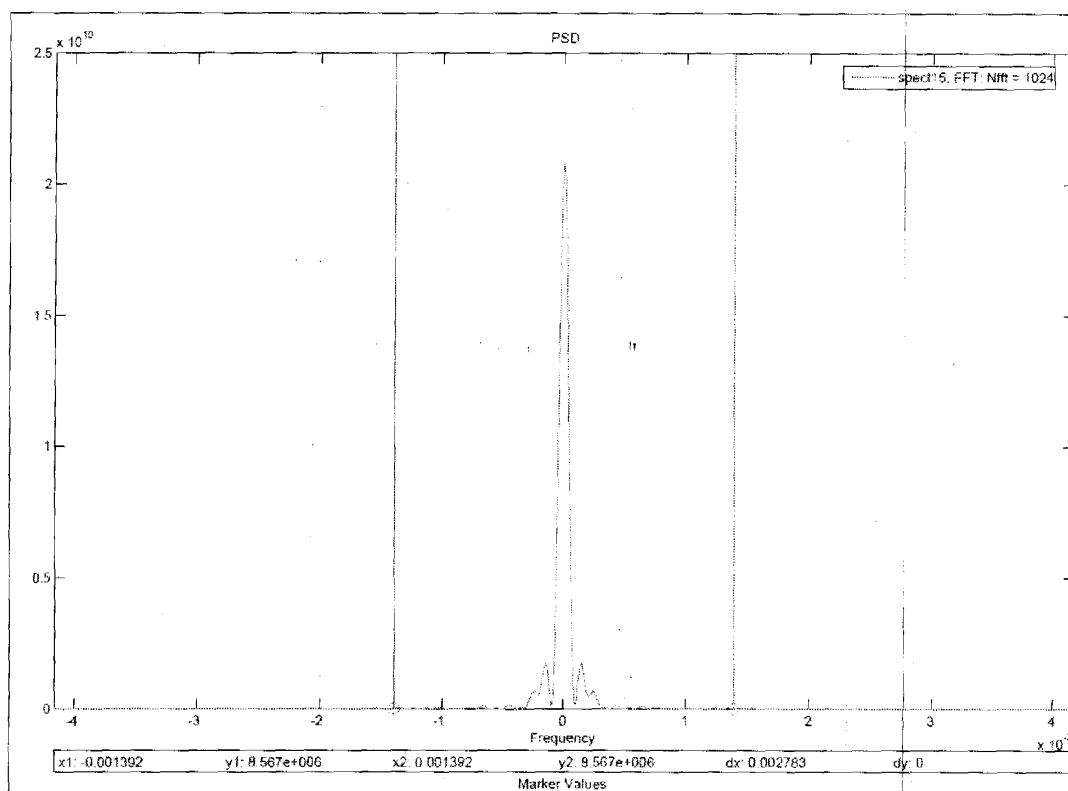


Рис. 2.9. Спектр дискретного сигналу "частота обертання валу нагнітача"

В додатку А наведені графіки зміни технологічних параметрів для ГПА №2, відновлені з частотою дискретизації  $\tau=20\text{с}$  із даних, які отримані під час проведення експериментальних досліджень.

Для визначення витрати газу через нагнітач необхідно мати інформацію про значення таких параметрів природного газу як густина, відносна густина, вміст азоту та оксиду вуглецю, а також коефіцієнт стисливості. Розглянемо ці параметри детальніше.

**Густина газового потоку.** За результатами хроматографічного аналізу визначені густина газу  $\rho$  та відносна густина газу  $\Delta = \frac{\rho_n}{\rho_{n,n}}$ , де  $\rho_{n,n}=1,206$  – густина повітря за нормальних умов,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , за повітрям при нормальних умовах. Періодичність відбору проб газу складає приблизно 10 діб.

Тому виникла задача про можливість використання середніх значень  $\rho$  і  $\Delta$  в розрахунках параметрів газу.

Для вирішення поставленої задачі були проаналізовані дані, які отримані протягом 2004-2008 рр. Із графіка зміни густини  $\rho$  в часі (додаток Б) видно, що дані мають певний тренд, проте він незначний і можна вважати, що математичне очікування  $\bar{x}_\rho = M[\rho]$  є незмінним в часі.

Проведені дослідження дають змогу в розрахунках користуватись середнім значенням густини газу [23]. Оцінка середнього значення густини газу:  $\bar{m}_\rho=0,679, \text{кг}/\text{м}^3$  ( $P_n=0,101325\text{МПа}$ ,  $T_n=293,15\text{К}$ ); оцінка дисперсії  $S_\rho^2=6,453 \cdot 10^{-7}$ ,  $(\text{кг}/\text{м}^3)^2$ .

Природний газ є реальним газом і його поведінка підкоряється рівнянню стану, яке має таку форму:

$$PV = ZMRT, \quad (2.3)$$

де  $P$  – абсолютний тиск, МПа;  
 $V$  – об'єм, який займає газ,  $\text{м}^3$ ;  
 $M$  – маса газу, кг.

Для нормальних умов  $Z=1$  і

$$P_n V_n = M_n R T_n \quad (2.4)$$

де  $M_n$  – маса газу за нормальних умов, кг.



Рівняння (2.3) і (2.4) дають можливість визначити густину газу для умов, які відмінні від нормальних.

Поділимо рівняння (2.3) на (2.4) і врахуємо, що  $\rho = M/V$ , а густина газу при нормальних умовах рівна  $\rho_H = M_H/V_H$ , тоді

$$\rho = \frac{\rho_H}{Z} \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \frac{T_H}{T}.$$

**Коефіцієнт стисливості газу.** Є два способи обчислення коефіцієнта стисливості газу: за допомогою номограм та аналітичний.

Обчислення коефіцієнта стисливості газу за допомогою номограм [111] має порівняно невисоку точність і даний метод непридатний для розв'язку відповідних задач газової динаміки за допомогою ЕОМ.

Серед емпіричних залежностей, за якими аналітично обчислюють коефіцієнт стислості  $Z$ , слід відмітити [1,23,112-113] такі:

$$\begin{aligned} Z(P,T,\Delta) &= (-0,457 \cdot 10^{-2} \Delta + 0,626 \cdot 10^{-3})(P-6) + 0,982, \text{ при } T < 298 \text{ }^\circ\text{K}; \\ Z(P,T,\Delta) &= (-0,345 \cdot 10^{-2} \Delta + 0,446 \cdot 10^{-3})(P-6) + 0,985, \text{ при } 298 \leq T < 323 \text{ }^\circ\text{K}; \\ Z(P,T,\Delta) &= (-0,125 \cdot 10^{-2} \Delta + 0,461 \cdot 10^{-3})(P-6) + 0,992, \text{ при } T \geq 323 \text{ }^\circ\text{K}; \\ Z(P,T,\Delta) &= 1 - ((P-6)(0,345 \cdot 10^{-2} \Delta - 0,446 \cdot 10^{-3}) + 0,015) \cdot (1,3 - 0,0144(T - 283,2)), \end{aligned} \quad (2.5)$$

де  $P$  – тиск газу, *атм*;

Сучасні методики розрахунку коефіцієнта стисливості газу, наведені в ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2007 (ИСО 5167-1:2003), охоплюють діапазон від 0 до 12 МПа [114].

Для робочих інтервалів тисків і температур досить точною є формула обчислення коефіцієнта стисливості газу у відповідності з ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2007. За цією формулою

$$Z = \left( 1 + \frac{1,32 \cdot 10^{-3}}{T_c^{3,25}} \right)^2 \cdot \frac{P_c}{B_1 / B_2 - B_2 + Q_2 / 3}, \quad (2.6)$$

де  $P_c = 0,6714P_{np}$ ;

$T_c = 0,71892T_{np}$ ;

$P_{np}$  і  $T_{np}$  – приведені тиск і температура [23,109].

Коефіцієнти  $B_1$ ,  $B_2$  і  $Q_2$  обчислюються у відповідності з ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2007 за формулою (2.6), приклад обчислення приведений у додатку Б.

### **2.3. Основні показники, які характеризують технічний стан газоперекачувальних агрегатів та методи їх визначення**

Як базову концепцію оцінки технічного стану устаткування потенційно небезпечних виробництв використовують підхід [115] який, заснований на принципі безпечної експлуатації за технічним станом, згідно з яким оцінка технічного стану об'єкту здійснюється за параметрами, що забезпечують його надійну роботу і безпечну експлуатацію згідно нормативно – технічної або конструкторської документації, а залишковий ресурс – за визначальними параметрами технічного стану (ПТС). Як визначальні ПТС приймають параметри, зміна яких (окремо або в деякій сукупності) може привести об'єкт в непрацездатний або граничний стан, тобто до його руйнування або створення аварійної ситуації.

Метою оперативної (функціональної) діагностики є отримання даних про технічний стан обстежуваного об'єкта, його технологічні параметри, умови взаємодії з навколишнім середовищем. Оперативна діагностика здійснюється на об'єкті безперервно, або дискретно, відповідно до заздалегідь розробленої і узгодженої із службами, відповідальними за експлуатацію об'єкта, програмою, з використанням штатного вимірювального комплексу, і полягає в реєстрації показників технологічного процесу (температури, тиску, потужності, рівня вібрації, витрати палива і продуктивності тощо), і їх подальшій статистичній обробці.

Метою експертного обстеження є отримання інформації про реальний

технічний стан об'єкта, наявності пошкоджень, виявленні причин і механізмів їх виникнення та розвитку.

Метою експертного аналізу пошкоджень і параметрів технічного стану об'єкта, що проводиться на підставі отриманих даних аналізу технічної документації, оперативної діагностики і експертного обстеження, є встановлення поточного стану об'єкту, рівня і механізму пошкоджень, фактичної завантаженості, щоб відповісти на питання, чи можлива подальша експлуатація об'єкту або необхідний подальший поглиблений аналіз його технічного стану.

З вище перелічених методів контролю і діагностування технічного стану ГПА параметричний метод використовується найчастіше, тому що він легко піддається математичному моделюванню за допомогою класичних методів термогазодинамічного опису процесів, що відбуваються в ГПА. Проте жоден з вищезгаданих методів, на сьогоднішній день, не може достовірно математично описати контрольований процес.

Ефективна діагностика технічного стану складних систем неможлива без їх послідовного структурного аналізу [116]. Для цього об'єкт дослідження повинен бути роздільний на підсистеми (комплекси, агрегати) і елементи (вузли і деталі).

Все, що не входить в технічну систему, є, по відношенню до неї, зовнішнім середовищем. Система може відчувати дії цього середовища і сама впливати на нього. Перші дії можна визначити як вхідні, другі - як вихідні. Система, сприймаючи всі ці дії, відповідає на них певними реакціями, такими як: зміною термогазодинамічних характеристик перекачуваного середовища, зносом пар тертя, виникненням пульсуючого потоку газу, зміною шорсткостей поверхонь проточних частин устаткування, появою відкладень, утворенням тріщин і, як наслідок, відмовами або пошкодженнями основних елементів, руйнуванням агрегатів і трубопроводних мереж, тощо. Всі ці негативні реакції системи певним чином впливають на режими роботи компресорної станції.

Сукупність всіх вихідних параметрів можна охарактеризувати, як вектор технічного стану компресорної станції. У свою чергу вектор технічного стану

приймається вимірювальними комплексами - датчиками, приладами, вимірювальними системами. Тут необхідно згадати, що вимірювальні комплекси так само, у свою чергу, є складними технічними системами.

Система керування, на підставі вектора відгуку, створює вектор корекції, який є ініціатором регулюючих дій як на вхідні чинники, так і на параметри самої технічної системи. Тобто оперативне управління компресорної станції, так само як і оптимізація технологічних режимів, здійснюється за допомогою вектора корекції, виведеного на підставі результатів аналізу технічного стану структурних груп (компресорів, пов'язаних з ними трубопровідних мереж тощо).

Основними параметрами, які характеризують роботу ВЦН є [117]:

- ступінь підвищення тиску газу у ВЦН;
- політропний к.к.д. ВЦН;
- продуктивність ВЦН;
- внутрішня потужність ВЦН;
- коефіцієнт технічного стану ВЦН.

Роботу і технічний стан ГТД характеризують такі показники [117]:

- потужність ГТД;
- коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю;
- коефіцієнт навантаження ГТД;
- наявна приведена потужність ГТД.

На основі сказаного вище, за основні параметри, що визначають технічний стан газоперекачувального агрегату, вибрані наступні:

- політропний коефіцієнт корисної дії відцентрового нагнітача;
- коефіцієнт технічного стану ВЦН за політропним к.к.д.;
- коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю;
- параметри вібродіагностики агрегату;
- результати діагностики стану моторної оливи.

Інші параметри, зокрема індекс концентрації  $K_p$  оксидів азоту і вуглецю у вихлопних, будуть враховані в подальших наукових працях.

Значення політропного к.к.д. ВЦН, коефіцієнта технічного стану ВЦН за політропним к.к.д., коефіцієнта технічного стану ГТД за потужністю визначатимемо на основі формул [117]:

**Політропний к.к.д. ВЦН  $\eta_{пол}$ :**

$$\eta_{пол} = l_{пол} / l,$$

де  $l$  – питома повна робота ВЦН;

$l_{пол}$  – питома політропічна робота стиснення газу у ВЦН;

$$l_{пол} = \frac{n_v}{n_v - 1} \cdot Z_H \cdot R \cdot (t_H + 273) \cdot \left( \varepsilon^{\frac{n_v - 1}{n_v}} - 1 \right),$$

де  $n_v$  – об'ємний показник політропи;

**Коефіцієнт технічного стану ВЦН за політропним к.к.д.  $K_{\eta_{пол}}$ :**

$$K_{\eta_{пол}} = \frac{\sum_{i=1}^s \eta_{пол}^i \cdot \eta_{пол.б}^i}{\sum_{i=1}^s (\eta_{пол.б}^i)^2},$$

де  $\eta_{пол}^i$  – фактичне значення політропного к.к.д. ВЦН для  $i$ -го режиму;

$\eta_{пол.б}^i$  – значення політропного к.к.д. ВЦН на базовій характеристиці за

приведеною об'ємною продуктивністю для  $i$ -го режиму;

$s$  – кількість контрольованих режимів.

**Коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю  $K_{N_e}$ :**

$$K_{N_e} = \frac{\sum_{i=1}^s \overline{N_{e пр}}^i \cdot \overline{N_{e пр.б}}^i}{\sum_{i=1}^s (\overline{N_{e пр.б}}^i)^2}$$

де  $\overline{N_{e пр}}^i$  – фактичне значення відносної приведеної потужності ГТД  $i$ -го режиму;

$\overline{N_{e пр.б}}^i$  – значення відносної приведеної потужності ГТД на базовій

характеристиці  $i$ -го режиму.

**Параметри вібродіагностики ГПА.** Як контрольований параметр інтенсивності вібрації ГПА рекомендується приймати [118,119] загальний рівень середньоквадратичного значення віброшвидкості. В залежності від інтенсивності вібрації вузлів ГПА передбачені такі якісні оцінки їх вібраційного стану: «відмінно», «добре», «допустимо», «необхідно приймати міри», «недопустимо».

Області «відмінно» і «добре» передбачені для оцінки якості ремонту і характеризують зборку вузлів у повній відповідності з ТУ.

Експлуатація ГПА із вібрацією вузлів, яка не перевищує границі області «допустимо», характеризується мінімальною ймовірністю появи дефектів в період міжремонтної експлуатації агрегату. Агрегати, які приймають із ремонту, повинні мати рівень вібрації, що не перевищує границь цієї зони.

«Потребує прийняття заходів» - експлуатація ГПА можлива, проте характеризується підвищеною ймовірністю виходу агрегату із ладу. Для агрегатів, що експлуатуються з інтенсивністю вібрації, яка відповідає даній оцінці, мають бути передбачені міри по усуненню причин підвищення вібрації.

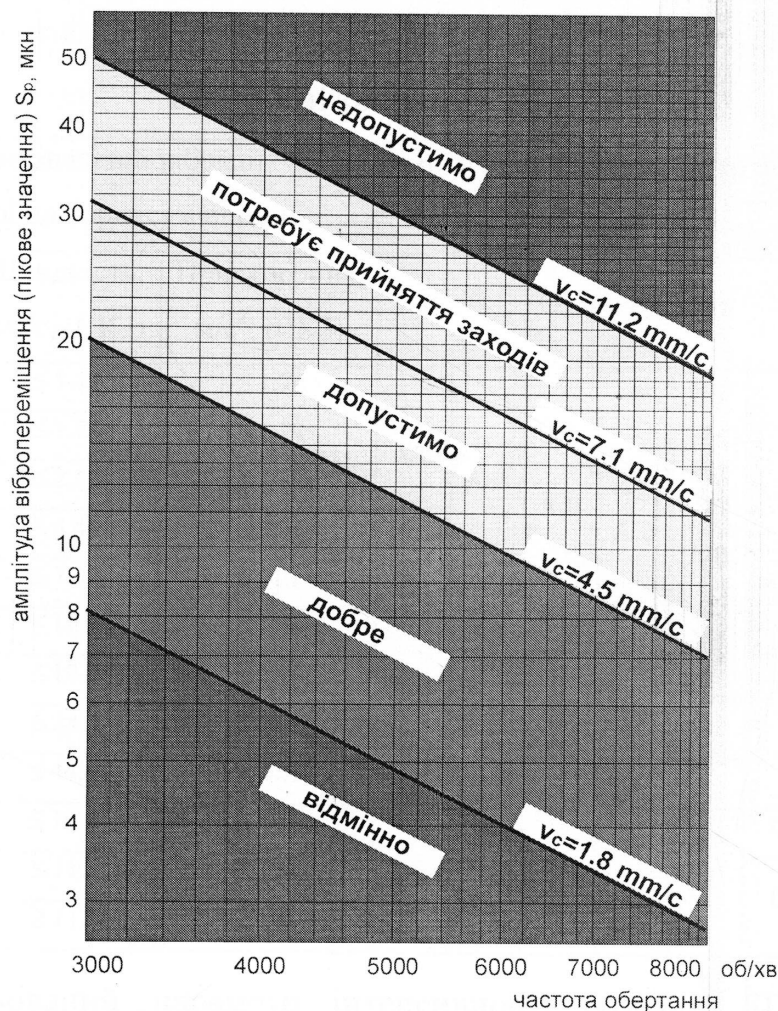
«Недопустимо» - експлуатація ГПА з вібрацією вузлів (одного з вузлів), яка відповідає цій області – забороняється. Дана область інтенсивності вібрації характеризує передаварійний стан агрегату, який виключає можливість його подальшої експлуатації без проведення спеціальних ремонтних робіт.

Оцінка вібраційного стану ГПА в цілому визначається найгіршою якісною оцінкою вібраційного стану одного із його вузлів.

Контроль інтенсивності вібрації необхідно проводити на ГПА з газотурбінним приводом після шести годин, а на агрегатах з авіаційними двигунами після двох годин неперервної роботи під навантаженням.

Пікові значення вібропереміщення для різних нормованих величин середньоквадратичного значення віброшвидкості показані на рис. 2.10.

Об'єктом вимірювання інтенсивності вібрації є корпуси підшипників, ділянки корпусів статора і маслопроводи обв'язки агрегатів.



**Рис. 2.10. Пікові значення віброшвидкості (оцінка вібраційного стану корпусів підшипників)**

Питання нормування вібрації різних типів машин детально розглянуто в [120], де проаналізовані основні стандарти. Вони містять норми на вібрацію як на стаціонарних частинах, так і на валах газотурбінних установок.

В таблиці 2.5 показані границі зон вібраційного стану агрегату:

А – вібрація введеного в експлуатацію агрегату;

В – агрегати із вібрацією в цій зоні, зазвичай, вважаються придатними для довготривалої неперервної експлуатації;

С – агрегати з вібрацією в цій зоні, вважаються незадовільними для довготривалої неперервної експлуатації. Вони можуть працювати протягом обмеженого часу;

Д – значення вібрації в межах цієї зони вважають достатньо інтенсивними, щоб викликати пошкодження агрегату.

Таблиця 2.5

## Граничні значення вібрації

Граничні значення вібрації, виміряної на корпусі машини			Класифікаційний номер вібрації						
			1	2	3	4	5	6	7
Зміщення, мкм, (СКЗ) $\geq 17.8$	Швидкість, мм/с, (СКЗ) $\geq 1.12$	Прискорення, м/с <sup>2</sup> , (СКЗ) $\geq 1.76$	Оціночні зони						
$\leq 28.3$	$\leq 1.78$	$\leq 2.79$	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B
$\leq 44.8$	$\leq 2.82$	$\leq 4.42$							
$\leq 71.0$	$\leq 4.46$	$\leq 7.01$							
$\leq 113$	$\leq 7.07$	$\leq 11.1$	C	D	D	D	D	D	D
$\leq 178$	$\leq 11.2$	$\leq 17.6$	C						
$\leq 283$	$\leq 17.8$	$\leq 27.9$	C						
$\leq 448$	$\leq 28.2$	$\leq 44.2$	D	D	D	D	D	D	D
$\leq 710$	$\leq 44.6$	$\leq 70.1$							
$\leq 1125$	$\leq 70.6$	$\leq 111$							
$\leq 1784$	$\leq 112$	$\leq 176$	D	D	D	D	D	D	C
$\geq 1784$	$\geq 112$	$\geq 176$							D

Як контрольований параметр інтенсивності вібрації ГПА прийнято загальний рівень середньоквадратичного значення віброшвидкості,

$$V_i^{(v)} = \sqrt{\frac{1}{I} \int_0^I v_i^2(t) dt},$$

де,  $V_i^{(v)}$  - середньоквадратичне значення віброшвидкості  $i$ -го ГПА, мм/с;

$v_i(t)$  - зміна віброшвидкості  $i$ -го ГПА в часі, мм/с;

$I$  – час усереднення, с,

та максимальні значення вібропереміщення  $S_i^{(v)}$  (мкм).

**Стан моторної оливи.** При оцінюванні рівня технічної експлуатації ГПА, стану параметрів робочого процесу, одне з важливих місць належить методам та засобам аналізу моторної оливи [121].

За концентрацією заліза, алюмінію, кремнію, хрому, міді, свинцю, олова та



інших характерних елементів в оливі можна визначити швидкість спрацювання деталей. За зміною концентрації хрому можна говорити про спрацювання колінчастого вала; кремнію та марганцю — крейцконфного вузла; свинцю, олова, сурми та міді — вкладишів колінчастого вала. В роботі Орлова О.А. [121] наведена формула для визначення швидкості накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі. Проте в результаті аналізу формули (8) [121] методом визначення розмірності, було виявлено, що в формулу закралась помилка. Тому здійснено повторний вивід формули для визначення швидкості накопичення продуктів спрацювання.

Продукти спрацювання надходять в оливу в процесі зношення та з оливою, яка доливається. Крім того, продукти спрацювання поділяються на такі, що залишаються в системі, та такі, що виносяться [121]. На основі закону матеріального балансу для проміжку  $t$  роботи системи до чергового доливання оливи, можемо записати:

$$c \cdot t + G_0 = G_s + G_a, \quad (2.7)$$

де 
$$G_0 = Q_0 \cdot K_0, \quad G_s = Q \cdot (K_t - K_{t-1}), \quad G_a = Q^* \cdot \frac{K_t + K_{t-1}}{2},$$

$c$  - середня швидкість спрацювання пар тертя, мг/год;

$t$  - час роботи у проміжку між доливаннями оливи, год;

$G_0$  - маса частинок, які надходять з оливою, що доливається, мг;

$G_s$  - маса частинок, які залишаються, мг;

$G_a$  - маса частинок, які виносяться з оливою, мг;

$Q$  - об'єм оливи в картері, л;

$Q_0$  - об'єм оливи, що доливається, л;

$K_0$  - концентрація продуктів спрацювання в оливі, що доливається, мг/л;

$K_t, K_{t-1}$  - концентрація продуктів спрацювання під час теперішнього та попереднього доливань оливи, відповідно, мг/л;

$Q^*$  - об'єм оливи, який втрачається з системи, л.

Підставивши вирази у формулу (2.7) та здійснивши деякі перетворення, отримаємо формулу для визначення концентрації продуктів спрацювання при доливанні оливи:

$$K_j = \frac{C \cdot t + Q_0 K_0 + K_{j-1} \cdot \left( Q - \frac{Q^*}{2} \right)}{Q + \frac{Q^*}{2}}. \quad (2.8)$$

Проте доливання оливи виконуються з періодичністю, значно меншою за періодичність відбору проб. Якщо вважати, що доливання мають рівномірний та постійний характер і кількість доливань рівна  $d$ , тоді, із формули (2.8), значення концентрації продуктів спрацювання  $K_j$  при черговому доливанні, враховуючи концентрацію під час попереднього обстеження  $K_{j-1}$ , буде визначатись за формулою:

$$K_j = \frac{(c \cdot t + Q_0 \cdot K_0) \cdot \frac{1 - \left( \frac{Q - Q^*/2}{Q + Q^*/2} \right)^d}{1 - \frac{Q - Q^*/2}{Q + Q^*/2}} + \left( \frac{Q - Q^*/2}{Q + Q^*/2} \right)^d \cdot K_{j-1} \cdot (Q - Q^*/2)}{Q + Q^*/2}. \quad (2.9)$$

Тоді значення середньої швидкості спрацювання у проміжках між відборами проб оливи із формули (2.9) буде рівним:

$$c = \frac{B \cdot K_j - B \cdot A^{d+1} K_{j-1} - D}{(\tau/d) \cdot (1 - A^d)}, \quad (2.10)$$

де

$$A = \frac{Q - \frac{Q^*}{2}}{Q + \frac{Q^*}{2}}, \quad B = (1 - A) \cdot A^{-1} \cdot (Q - Q^*/2), \quad D = Q_0 \cdot K_0 \cdot (1 - A^d),$$

$K_j, K_{j-1}$  - концентрація продуктів спрацювання під час теперішнього та попереднього замірів, відповідно, мг/л;

$\tau$  - час роботи КУ у проміжку між аналізами оливи, год;

$d$  - кількість доливань оливи.

З метою прогнозування та з врахуванням часу, який необхідний для стабілізації концентрації металів в оливі, доцільно проводити періодичні відбори оливи для аналізу через кожні 200-250 годин роботи [121]. Відбір проб необхідно проводити не раніше, ніж через 1 годину безперервної роботи ГПА.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Проведений аналіз роботи газоперекачувальних агрегатів компресорної станції як об'єктів керування дав змогу визначити вхідні та вихідні параметри моделі процесу компримування природного газу.

2. Обґрунтовано методику експериментального дослідження з метою отримання матеріалу для побудови моделей процесу компримування газу, що дало змогу включити в модель технологічні параметри та параметри, які характеризують вплив зовнішнього середовища на роботу ГПА.

3. Аналіз зміни густини природного газу дозволив встановити, що така зміна характеризується певним трендом. За допомогою інтервальних оцінок встановлено, що виявлений тренд є незначним і для практичних розрахунків можна користуватись середнім значенням густини газу.

4. Розроблена методика вибору кроку дискретизації для технологічних параметрів процесу компримування природного газу з використанням існуючої системи збору інформації про хід технологічного процесу, яка забезпечує архівування результатів вимірювання за тривалий проміжок часу. Отримані значення часу дискретизації дають змогу оптимізувати об'єм вихідного експериментального матеріалу при побудові емпіричних математичних моделей процесу.

5. Приведена методика обчислення основних параметрів, що визначають реальний стан газоперекачувального обладнання на основі його параметричної, вібро- та трібодіагностики, яка дає можливість ранжирування ГПА за технічним станом.

## РОЗДІЛ 3 "

### МЕТОДИКА РАНЖИРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ЇХ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

#### 3.1. Експертна система оцінки технічного стану газоперекачувального обладнання на основі нечіткої логіки

Оскільки метою оптимального керування процесом компримування природного газу є оптимізація режиму роботи КС виходячи із технічного стану газоперекачувального обладнання, постає питання ідентифікації технічного стану ГПА.

Загалом технічний стан визначають на основі діагностичних ознак, вибір яких повинен бути раціональним. З метою діагностування повинні вибиратись найбільш істотні, найбільш значимі та інформативні з них [122]. Тому, на основі проведеного аналізу методів технічної діагностики, які використовуються на КС, вибрані такі показники технічного стану газоперекачувального обладнання:

- за результатами трібодіагностики:

1. Швидкість накопичення продуктів спрацювання пар тертя в моторній оливі;

- за результатами параметричної діагностики:

2. Коефіцієнт технічного стану ВЦН за політропним к.к.д.;

3. Коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю;

- за результатами вібродіагностики:

4. Середньоквадратичне значення віброшвидкості;

5. Вібропереміщення.

Сукупність вказаних параметрів в повній мірі характеризує технічний стан двигача та ГТУ. Проте жоден параметр не вимірюється безпосередньо. Їх значення можна отримати тільки шляхом проведення розрахунків. А для інтенсивності вібрації вузлів ГПА передбачені такі лінгвістичні оцінки їх вібраційного стану: «відмінно», «добре», «допустимо», «необхідно приймати міри», «недопустимо» [120].

Відповідно постає задача створення програмного забезпечення, яке дасть змогу оцінити технічний стан на основі цих параметрів.

Враховуючи об'єктивно існуючу нечіткість інформації про об'єкт, доцільно використати апарат нечіткої логіки [123], який дає можливість об'єктивно і більш ефективно оцінити технічний стан, використовуючи нелінійні принципи формування висновків, змоделювати міркування експертів в тій предметній області, яка розглядається.

Експертні системи (ЕС) [124] складається з таких функціональних частин: база даних (БД), в якій зберігаються еталонні і фактичні дані про процес, результати їх порівняння, концептуальна і фізична моделі ГТД; база знань (БЗ): статична (знання зберігаються у вигляді експертних знань, а також формул, фактів, залежностей, таблиць, понять конкретної наочної області); динамічна (знання зберігаються комбінованими моделями НС [124] у вигляді еталонних динамічних процесів, з урахуванням часткової або повної невизначеності параметрів діагностування). Користувач-експерт подає експертні знання про діагностику ГТД у вигляді наборів прикладів.

Простота і невисока вартість розробки фазі-систем керування сприяє широкому застосуванню цієї технології в автоматизації процесів керування об'єктами нафтової і газової промисловості.

Принципи нечіткої логіки є методами системного підходу і базуються на інтуїції та досвіді експертів, використовуючи елементи повсякденної мови для опису поведінки систем контролю або керування.

Під *правилом нечіткої продукції* або просто - *нечіткою продукцією* розуміється вираз такого вигляду:

$$(i) : \Omega; \Pi; A \Rightarrow B, S, F, Y, \quad (3.1)$$

де  $(i)$  - ім'я нечіткої продукції;

$\Omega$  - сфера застосування нечіткої продукції;

$\Pi$  - умова застосування ядра нечіткої продукції;

$A \Rightarrow B$  - ядро нечіткої продукції;

$S$  - метод визначення кількісного значення істинності ядра;

$F$  - коефіцієнт визначеності нечіткої продукції;

$Y$  - постумова нечіткої продукції.

*Нечітким лінгвістичним висловом* називатимемо вислови наступних видів.

Вислів " $\beta \in \alpha$ ", де  $\beta$  - найменування лінгвістичної змінної;  $\alpha$  - її значення, якому відповідає окремий лінгвістичний терм з базової терм-множини  $Y$  лінгвістичної змінної  $\beta$ .

Вислів " $\beta \in \nabla \alpha$ ", де  $\nabla$  - *модифікатор*, який відповідний таким словам, як: "Дуже", "Більш-менш", "Набагато більше" і іншим, які можуть бути отримані з використанням процедур  $G$  і  $M$  даної лінгвістичної змінної.

Складені вислови, утворені з висловів двох попередніх видів, і нечітких логічних операцій у формі зв'язок: "І", "АБО", "ЯКЩО-ТО", "НЕ".

Основна особливість нечітких правил, які використовуються в системах нечіткого висновку - умови і висновки окремих нечітких правил формулюються у формі нечітких висловів, одного із перелічених вище видів, щодо значень тих або інших лінгвістичних змінних.

Таким чином, усюди далі під *правилом нечіткої продукції* або просто - *нечіткою продукцією* розумітимемо вираз (3.1) за винятком того, що умова ядра (антецедент)  $A$  і висновок ядра (консеквент)  $B$  є нечіткі лінгвістичні вислови.

Коли нечіткими логічними операціями сполучені нечіткі вислови, що відносяться до різних лінгвістичних змінних в умові правила нечіткої продукції, правило може бути записане у формі:

$$\begin{aligned} & \text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ЯКЩО } \beta_1 \in \alpha^1 \text{ } I \text{ } \beta_2 \in \alpha^2 \text{ } \text{ТО } \beta_3 \in \lambda \\ & \qquad \qquad \qquad \text{або} \\ & \text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ЯКЩО } \beta_1 \in \alpha^1 \text{ } \text{АБО } \beta_2 \in \alpha^2 \text{ } \text{ТО } \beta_3 \in \lambda, \end{aligned} \quad (3.2)$$

Тут нечіткі вислови: " $\beta_1 \in \alpha^1$ "  $I$  " $\beta_2 \in \alpha^2$ ", " $\beta_1 \in \alpha^1$ "  $\text{АБО}$  " $\beta_2 \in \alpha^2$ " представляють умови правил нечітких продукцій, а " $\beta_3 \in \lambda$ " - висновок правил.

### 3.2. Принципи ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом

Спираючись на роботи із застосування нечіткої логіки [126-130] сформулюємо ряд методологічних принципів, які будемо використовувати при ранжируванні нагнітачів за їх технічним станом.

*Принцип лінгвістичності входних і вихідних змінних.* У відповідності з цим принципом, входи об'єкта і його вихід розглядаються як лінгвістичні змінні, які оцінюються нечіткими термами. Як входні лінгвістичні змінні й відповідні термножини, які будуть використовуватися в задачі ранжирування, взято:

«швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі»;

«коефіцієнт технічного стану нагнітача»;

«коефіцієнт технічного стану ГТД»;

«віброшвидкість»;

«вібропереміщення».

Як вихідну лінгвістичну змінну використано множину «узагальнений коефіцієнт технічного стану».

*Принцип формування структури діагностичної залежності «входи – вихід» у вигляді нечіткої бази знань.*

Формування нечіткої бази знань в [128] трактується як аналог етапу структурної ідентифікації, на якому будується груба модель діагностування з параметрами, що підлягають настроюванню. Крім цього, сукупність правил «Якщо – тоді» можна розглядати як набір експертних точок у просторі «входи – вихід». Застосування нечіткого висновку дозволяє відновлювати за цими точками багатовимірну поверхню «входи - вихід».

*Принцип навчання нечітких баз знань.* У відповідності з цим принципом побудова моделі ранжирування здійснюється у два етапи, які за аналогією з класичними методами [131] можна вважати етапами структурної і параметричної ідентифікації. Перший етап - це формування за достушною експертною

інформацією нечіткої бази знань – грубої моделі. Чим вищий професійний рівень експерта, тим краще адекватність нечіткої моделі, побудованої на першому етапі. Однак, співпадання результатів нечіткого висновку (теорія) і експериментальних даних, не є гарантованим. Тому необхідний другий етап, на якому навчають нечітку модель шляхом настроювання її параметрів на основі експериментальних даних. Суттю другого етапу ідентифікації є підбір таких ваг нечітких правил з бази знань, і таких параметрів функцій належності, які мінімізують відхилення між експериментальними даними і результатами нечіткого висновку [128]. Навчання нечіткої бази знань зводиться до задачі нелінійної оптимізації, яка може бути вирішена різними методами. Для навчання великих баз знань доцільно використовувати генетичні алгоритми [132], які дозволяють значно ефективніше за звичайні методи математичного програмування (метод найшвидшого спуску, квазіньютонівські методи, тощо) [133] розв'язати складні задачі оптимізації. Генетичні алгоритми є аналогом випадкового пошуку, який ведеться одночасно з різних початкових точок із використанням операцій схрещення, мутації та селекції.

### **3.3. Метод та алгоритми ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом**

Метод визначення узагальненого коефіцієнта технічного стану  $k_i^T$   $i$ -го агрегату ґрунтується на ранжируванні агрегатів за їх технічними станом [134]. Для вирішення задачі ранжирування будемо використовувати метод нечіткого висновку.

Інформацією, яка поступає на вхід системи нечіткого висновку, є виміряні, деяким чином, вхідні змінні. Ці змінні відповідають реальним змінним процесу керування. Інформація, яка формується на виході системи нечіткого висновку, відповідає вихідним змінним процесу керування.

Системи нечіткого висновку призначені для перетворення значень вхідних



змінних процесу у вихідні змінні на основі використання нечітких правил продукцій. Для цього системи нечіткого висновку повинні містити базу правил нечітких продукцій і реалізовувати нечітке виведення висновків на основі умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловів.

На даний час запропоновано декілька алгоритмів нечіткого висновку. Найбільше застосування в системах нечіткого висновку отримали алгоритми Мамдані (Mamdani), Цукамото (Tsukamoto) та Сугено (Sugeno).

Оснoву проектування нечітких систем складає конструювання бази знань (БЗ) з використанням методів зображення та пошуку знань. В базі знань досвід і знання оператора-експерта можна заповнити наступним чином: оператор-експерт формує свою дію при кожній ситуації у вигляді продукції ЯКЩО...ТО..., множина яких складає базу знань.

Як оператор-експерт виступає кваліфікований спеціаліст (оператор з досвідом або інженер), який досконало знає предметну область.

При проектуванні експертної системи значні зусилля і час витрачається на розробку БЗ: на накопичення знань, визначення моделі їх подання, структурування, заповнення бази знань і підтримання її в актуальному стані.

БЗ інтелектуальної системи повинна містити знання спеціалістів з керування ГПА, які враховують реально існуючі важко формалізовані взаємозв'язки технологічних параметрів.

Множина правил-продукцій - це апріорні знання про технологічний процес і дотримуються експертами на основі їх досвіду й інтуїції з використанням логічних зв'язків І, АБО, НІ та імплікацій "ЯКЩО...ТО...".

Як було визначено раніше, за основні параметри, які визначають технічний стан  $i$ -го ГПА вибрано наступні: швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі  $C_i$ , коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним к.к.д.  $K_i^{(H)}$ , коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю  $K_i^{(T)}$ , середньоквадратичне значення віброшвидкості  $V_i^{(v)}$  та вібропереміщення  $S_i^{(v)}$  (максимальне значення серед усіх контрольованих точок).

Між цими параметрами і величиною  $k_i^T$  існує певний функціональний зв'язок

$$k_i^T = f_i(C_i, K_i^{(n)}, K_i^{(r)}, V_i^{(v)}, S_i^{(v)}).$$

Введемо наступні позначення:  $x_i^{(1)} = C_i$ ;  $x_i^{(2)} = K_i^{(n)}$ ;  $x_i^{(3)} = K_i^{(r)}$ ;  $x_i^{(4)} = V_i^{(v)}$ ;  $x_i^{(5)} = S_i^{(v)}$ . Тоді

$$k_i^T = f_i(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, x_i^{(3)}, x_i^{(4)}, x_i^{(5)}), \quad i = \overline{1, m},$$

$m$  - кількість ГПА.

Обґрунтування зв'язку між запропонованими параметрами та узагальненим коефіцієнтом технічного стану наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

**Обґрунтування впливу параметрів  $(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)}, x^{(5)})$  на технічний стан газоперекачувального обладнання**

Параметр	Приклад взаємозв'язку	Джерело
$x^{(1)}$ - швидкість вакопичення продуктів спрацювання в моторній оливі	Цей параметр суттєво впливає на технічний стан, оскільки характеризує стан підшипників газоперекачувального обладнання.	[103]
$x^{(2)}$ - коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним к.к.д.; $x^{(3)}$ - коефіцієнт технічного стану компресійного двигуна (ГД) за потужністю	Основні величини параметричної діагностики, які характеризують технічний стан агрегату та його окремих елементів за зміною технологічних і паливно-енергетичних показників - потужності, продуктивності, К.К.Д. приводу і нагнітача в процесі експлуатації.	[99]
$x^{(4)}$ - віброшвидкість; $x^{(5)}$ - вібропереміщення	В деяких випадках вібрація може стати такою значною, що примусить здійснити вимушену зупинку агрегату. Інакше підвищена вібрація може привести до швидкого зносу і руйнування вузлів двигуна, перш за все тих, які найбільшою мірою схильні до вібрації.	[100-102]

Області зміни параметрів, які характеризують технічний стан ГПА, визначимо у вигляді діапазонів:

$$X_i^{(k)} \in [x_{i,\min}^{(k)}; x_{i,\max}^{(k)}], \quad k = \overline{1, d}, \quad d = 5, \quad (3.3)$$

де  $d$  – кількість параметрів, що характеризують технічний стан.

Аналогічно для вихідної змінної  $k_i^T$  будемо мати

$$K_i^T \in [(k_i^T)^{(\min)}; (k_i^T)^{(\max)}], \quad (3.4)$$

де індексами  $min$ ,  $max$  позначені нижні та верхні значення як вхідних  $x_i^{(k)}$ , так і вихідної  $k_i^T$  змінних.

На основі проведеного аналізу роботи компресорних станцій встановлено діапазон зміни цих параметрів (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Області зміни параметрів

Параметр	Діапазон зміни
$x^{(1)}$ - швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі, мг/год	[0;10]
$x^{(2)}$ - коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним к.к.д.	[0.7;1]
$x^{(3)}$ - коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю	[0.7;1]
$x^{(4)}$ - віброшвидкість, мм/с	[0;12]
$x^{(5)}$ - вібропереміщення, мкм	[0;50]
$k^T$ - узагальнений коефіцієнт технічного стану	[0.5;1]

Припустимо, що вхідні і вихідні змінні – це лінгвістичні змінні, які задані на універсальних множинах (3.3) і (3.4). Значеннями лінгвістичної змінної є слова або речення природної мови, тобто терми. Для оцінки лінгвістичних змінних будемо використовувати якісні терми із наступних терм-множин:

$$L_i^{(f)} = \{l_i^{(1)}, l_i^{(2)}, \dots, l_i^{(q_i)}\},$$

$$K_i^T = \{k_i^{(1)}, k_i^{(2)}, \dots, k_i^{(t_i)}\},$$

де  $L_i^{(f)}$ ,  $K_i^T$  - терм-множини вхідних  $x_i^{(f)}$  та вихідної  $k_i^T$  змінних;

$l_i^{(p)}$  -  $p$  - й лінгвістичний терм вхідної змінної  $x_i^{(f)}$ ,  $p = \overline{1, q_f}$ ;

$k_i^{(s)}$  -  $s$  - й лінгвістичний терм вихідної змінної  $k_i^T$ ,  $s = \overline{1, b_i}$ ;

$q_f$ ,  $b_i$  - кількість лінгвістичних термів змінних  $x_i^{(f)}$  і  $k_i^T$ ;

$i$  - номер нагнітача;

$f$  - номер змінної.

Тоді процес фазифікації відбувається на основі нечітких правил  $R_i^{(j)}$ , які мають такий вигляд [135-136]:

$$R_i^{(j)}: \text{якщо } (x_i^{(1)} \text{ це } L_i^{(j1)} \text{ і } x_i^{(2)} \text{ це } L_i^{(j2)} \dots \text{ і } x_i^{(k)} \text{ це } L_i^{(jk)}), \text{ то } k_i^T \text{ це } K_i^{(js)}, j = \overline{1, D}, \quad (3.5)$$

де  $D$  - кількість нечітких правил;

$L_i^{(jp)}$ ,  $K_i^{(js)}$  - елементи множин  $L_i^{(p)}$  та  $K_i^{(s)}$ .

Увівши позначення  $L_i = L_i^{(1)} \times L_i^{(2)} \times \dots \times L_i^{(q_f)}$  та  $(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(h)})^T = x_i \in X_i$ , де  $X_i = X_i^{(1)} \times X_i^{(2)} \times \dots \times X_i^{(h)}$ , а символом « $\times$ » позначено декартовий добуток множин, правило подамо у вигляді нечіткої імплікації

$$R_i^{(j)}: L_i^{(j)} \rightarrow K_i^{(j)}. \quad (3.6)$$

Це означає, що правило (3.6) можна інтерпретувати як нечітке відношення на множині  $L_i \times K_i$ , тобто  $R_i^{(j)} \subseteq L_i \times K_i$  - нечітке відношення з функцією належності

$$\mu_{R_i^{(j)}} = \mu_{L_i^{(j)} \rightarrow K_i^{(j)}}(x_i, k_i). \quad (3.7)$$

На основі нечітких правил (3.5) необхідно прийняти певне рішення стосовно технічного стану ГПА. У відповідності з правилом modus ponens таке рішення визначається співвідношенням [135]:

$$k_i^{(j)} = L_i^{(j)} \circ R_i^{(j)}, \quad (3.8)$$

де « $\circ$ » - символ операції композиції.

Якщо відомі функції належності  $\mu_i(x_i^{(f)})$ ,  $i = \overline{1, m}$ , то знайти функцію належності (3.7) можна за одним із правил [135]. Найчастіше використовують

правило Мамдані, у відповідності з яким

$$\mu_{R^{(h)}} = \mu_1(x_i^{(1)}) \wedge \mu_2(x_i^{(2)}) \wedge \dots \wedge \mu_n(x_i^{(h)}) = \min(\mu_1(x_i^{(1)}), \mu_2(x_i^{(2)}), \dots, \mu_n(x_i^{(h)})). \quad (3.9)$$

Лінгвістичні змінні відрізняються від нумеральних (числових) змінних тим, що їхніми величинами є не числа, а слова і вирази звичайної розмовної мови чи, в деяких випадках, спеціалізованої.

Для маніпуляції такими лінгвістичними значеннями необхідна їхня інтерпретація. З цією метою використано апарат нечітких множин, де кожному значенню параметра ставилась у відповідність функція належності. Функції належності можуть бути отримані спеціально розробленими методами, серед яких найбільше розповсюдження отримали: метод статичної обробки інформації [137] і метод парних порівнянь [138]. Крім цього можна скористатися стандартними функціями належності [139].

В [140] зазначено, що нечіткі множини, з якими приходиться оперувати при вирішенні практичних задач є унімодальними і нормальними. Одним із унімодальних методів апроксимації унімодальних нормальних нечітких множин є апроксимація за допомогою функцій (L-R) типу [140]. Проте використання таких функцій пов'язане з трудоемністю процедури підбору невідомих параметрів на основі експертної інформації. Тому виникає задача побудови функції належності в умовах мінімуму вихідних даних, до яких відносяться:

- назва параметру  $x_i^{(f)}$ ,  $f = \overline{1, d}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;
- діапазон  $\left[ \underline{x}_i^{(f)} \quad \overline{x}_i^{(f)} \right]$  зміни параметру  $x_i^{(f)}$ ;
- кількість термів  $q_f$ , що використовуються для оціни параметрів  $x_i^{(f)}$ ;
- назва кожного лінгвістичного терму.

В літературі стосовно визначення кількості термів не дано конкретних рекомендацій. Їх кількість вибирається з інтервалу  $7 \pm 2$  [141]. Подальше збільшення кількості термів веде до ускладнення моделі без підвищення її точності. Враховуючи вищенаведене, постає завдання вибору кількості термів параметрів, які характеризують технічний стан ГПА.

Кількість термів може бути визначена двома способами [141]:

- задатися деякою універсальною множиною, а потім перейти до реальних фізичних величин на основі використання знань експертів;

- визначити кількість термів, виходячи з діапазону зміни деякої величини  $X_i$  та інтервалу квантування  $\Delta X_i$ :

$$r = \frac{X_i}{\Delta X_i}; \Delta X_i = X_{i+1}^* - X_i^*,$$

де  $X_i^*$  - рівень квантування.

Згідно другого способу інтервал квантування  $\Delta X_i$  треба вибирати з урахуванням густини розподілу завад таким чином, щоб функції належності нечітких множин не залежали від них. Для будь-якого неперервного сигналу, залежно від рівня завад і потрібної точності, кількість термів визначаються різницею між сусідніми значеннями цих термів – кроком квантування.

При впливі на сигнал флуктуаційних завад, які характеризуються нормальним законом розподілу ймовірностей, крок квантування сигналу за рівнем вибирається з умови  $\Delta X \geq 10 \cdot \sigma$ , де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення завад.

Крок квантування  $\Delta X$  при рівномірному квантуванні за рівнем вибирається також, виходячи з допустимої похибки вимірювань  $\delta$ . Якщо допустиме значення основної зведеної похибки приладу  $\delta$  задане, то за відомими межами зміни величини  $X_i$  крок квантування  $\Delta X_i$  можна визначити, користуючись формулою [141]:

$$\Delta X_i = \frac{2\delta}{100} (X_{i\max} - X_{i\min}). \quad (3.10)$$

Рівномірне квантування забезпечує найбільш точне відтворення квантованого сигналу  $X(t)$  за дискретними вимірами у моменти часу  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$  і максимальна похибка квантування в цьому випадку не перебільшує  $\frac{\sigma}{2}$ .

Кількість рівнів квантування на заданому діапазоні вимірювання параметра буде дорівнювати

$$b = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{\Delta X_i}, \quad (3.11)$$

або після підстановки (3.10) у (3.11),  $b = \frac{50}{\delta}$ .

Враховуючи, що для технічних засобів контролю технологічних параметрів процесу компримування природного газу  $\delta = \pm 2.5\%$  або  $\delta = \pm 1.5\%$ , кількість рівнів квантування дорівнюватиме 20 або 33. Проте, це вступає у протиріччя з таким показником статистичного контролю як розмах [141]:

$$R_g = \max\{y_{gk}\} - \min\{y_{gk}\},$$

де  $\max\{y_{gk}\}$ ,  $\min\{y_{gk}\}$  – найбільше і найменше значення показника  $y$  за декілька вимірів  $g = 1, 2, 3, \dots, m$ .

Формули для розрахунку нижньої  $K_n$  і верхньої  $K_a$  границь розмаху можна отримати, скориставшись співвідношенням [141]:

$$K_n = y_0 - \frac{\sigma_y}{\sqrt{Y}} \cdot U_{0.95},$$

$$K_a = y_0 + \frac{\sigma_y}{\sqrt{Y}} \cdot U_{0.95},$$

де  $y_0$  – номінальне значення контрольованого параметру;

$\sigma_y$  – середньоквадратичне відхилення;

$U$  – значення нормованої нормальної випадкової величини;

$Y$  – об'єм вибірки.

Якщо номінальне значення і величина дисперсії невідомі, тоді потрібно використовувати їх оцінки.

Аналіз експериментальних даних показав, що розмахи контрольованих параметрів значно більші кроків квантування за рівнем, що визначені за формулою (3.10), і тому носієм нечіткого числа  $X$  може бути лише фактичний розмах контрольованого параметру.

Для визначення кількості термів скористаємося методикою подання невизначених вихідних даних, які описують процес як динамічний стохастичний

об'єкт, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності.

Якщо відомі мінімальне  $\underline{x}_i$  і максимальне  $\bar{x}_i$  значення кожного сигналу, можна визначити інтервали, в яких знаходяться їх припустимі значення.

Кожний визначений таким чином інтервал розділимо на  $w$  відрізків

$$w_i = \frac{\bar{x}_i - \underline{x}_i}{R_i}, \quad (3.12)$$

де  $R_i$  - розмах контрольованого параметру.

Діапазони змін параметрів технічного стану передбачено такими:  $x^{(1)}$  - [0;10];  $x^{(2)}$  - [0.7; 1];  $x^{(3)}$  - [0.70; 1];  $x^{(4)}$  - [0; 12];  $x^{(5)}$  - [0; 50].

Значення розмахів (рис. 3.1) приймаємо рівними:  $R_1 = 4.4 - 1.98 = 2.42$ ;  $R_2 = 0.96 - 0.9 = 0.06$ ;  $R_3 = 0.99 - 0.94 = 0.05$ ;  $R_4 = 5.4 - 3.2 = 2.2$ ;  $R_5 = 27 - 18 = 9$ .

Тоді кількість термів, яка потрібна для фазифікації технологічних параметрів в межах допуску, може бути визначена за формулою (3.12). Результати розрахунків наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Кількість термів, яка потрібна для фазифікації параметрів в межах допуску

Назва параметра	Необхідна кількість термів
Швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі	4
Коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним ж.к.д.	5
Коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю	5
Віброшвидкість	5
Вібропереміщення	5

Як видно із таблиці 3.3 для більшості параметрів необхідна кількість термів рівна 5. Тому, для опитування експертів було використано розбиття усіх параметрів на п'ять термів, які носять назву:

- «low» (низький) – L;
- «middlelow» (середньо-низький) – ML;
- «middle» (середній) – M;
- «middlehigh» (середньо-високий) – MH;
- «high» (високий) – H.



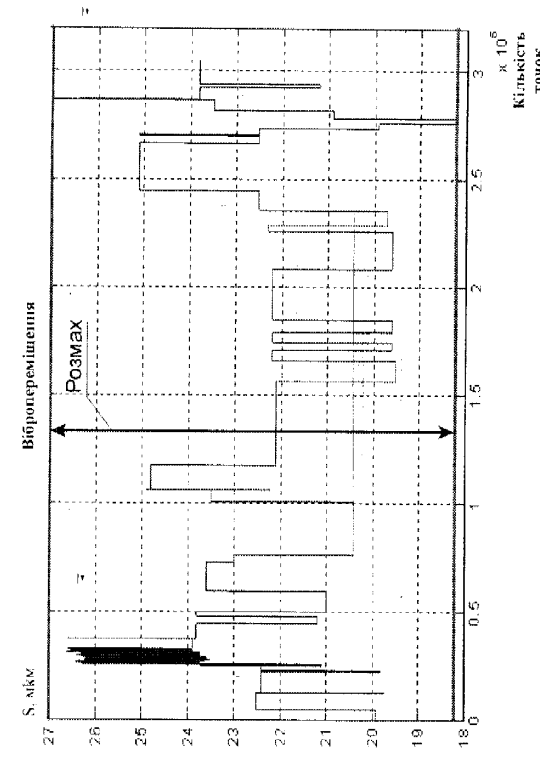
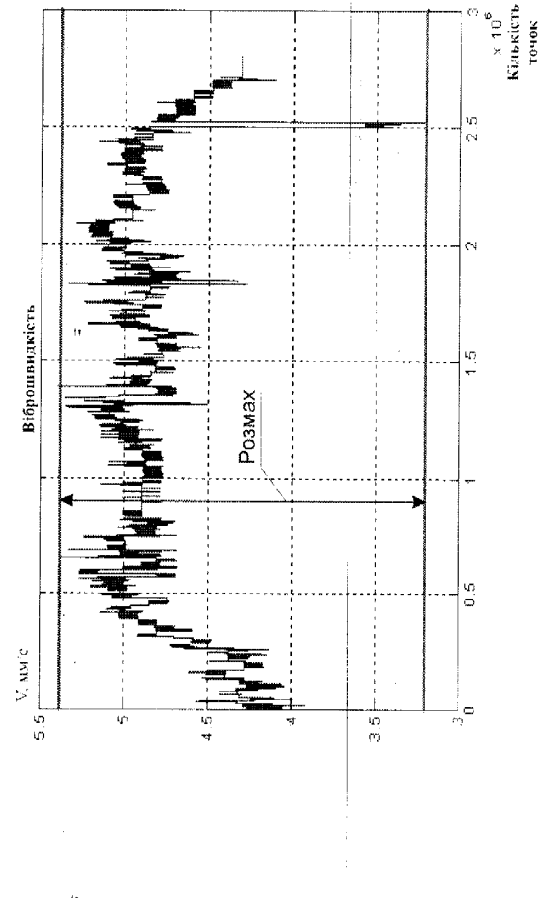
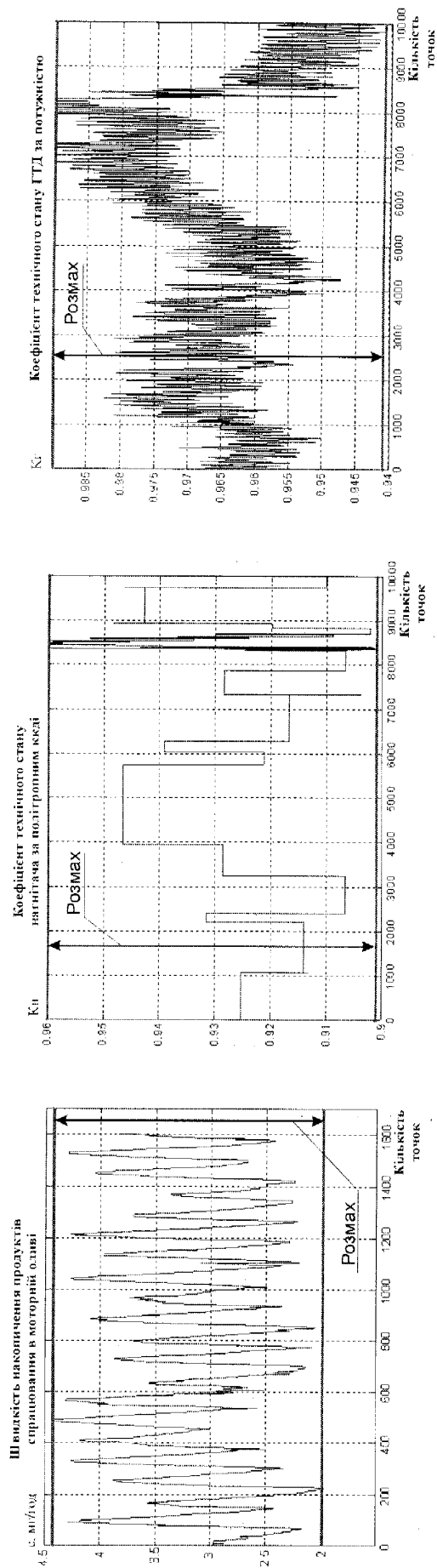


Рис. 3.1. Розмах параметрів

Функції належностей вхідних  $x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)}, x^{(5)}$ , та вихідного  $k^r$  параметрів побудовано з використанням кількох методів: методі, який заснований на статистичній обробці тверджень кількох експертів; методі парних порівнянь, який виконується одним експертом; методі нечіткої кластеризації. При цьому дані множини: множина термів  $L = \{L, ML, M, MH, H\}$  та універсальні множини вхідних та вихідного параметрів:  $U_1 = \{[0, 0.1), [0.1, 0.3), [0.3, 0.5), [0.5, 0.7), [0.7, 1)\}$ ,  
 $U_2 = \{[0.7, 0.76), [0.76, 0.82), [0.82, 0.88), [0.88, 0.94), [0.94, 1)\}$ ,  
 $U_3 = \{[0.7, 0.76), [0.76, 0.82), [0.82, 0.88), [0.88, 0.94), [0.94, 1)\}$ ,  
 $U_4 = \{[0, 2), [2, 4), [4, 7), [7, 10), [10, 12)\}$ ,  $U_5 = \{[0, 5), [5, 10), [10, 20), [20, 30), [30, 50)\}$ ,  
 $U_6 = \{[0.5, 0.6), [0.6, 0.7), [0.7, 0.8), [0.8, 0.9), [0.9, 1)\}$ .

Розглянемо кожен з цих методів.

**Метод статистичної обробки експертної інформації.** Як експерти використовувались технологи-оператори компресорних станцій. Кожен експерт заповняв анкету, в якій вказував свою думку про наявність у елементів властивостей нечіткої множини (табл. 3.4).

За результатами анкетування степені належності  $u_{i,j}$  нечіткій множині  $l_p$  розраховувались так

$$\mu_{l_p}(u_{i,j}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_{p,i}^k,$$

де  $b_{p,i}^k$  - думка  $k$ -го експерта про наявність у елемента  $u_{i,j}$  властивостей нечіткої множини  $l_p$ , при цьому  $b_{p,i}^k = 1$ , якщо елемент має властивості нечіткої множини, та  $b_{p,i}^k = 0$ , якщо не має (дод. В);

$p = \overline{1, q}$ ,  $q$  - кількість лінгвістичних термів;

$i = \overline{1, f}$ ,  $f = 6$  - кількість параметрів;

$j = \overline{1, 5}$  - кількість підмножин множини  $U_i$  параметрів;

$K$  - кількість експертів.

Результати опрацювання думок експертів зведені в табл. 3.5 і на їх основі побудовані графіки функцій належності (дод. Д).

Таблиця 3.4

## Анкета експертного опитування

Діапазон	Експерт	1	2	3	4	5
<b>швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі</b>						
0 ÷ 0,15		L	L	L	L	L
0,15 ÷ 0,3		ML	L	L, ML	L, ML	L
0,3 ÷ 0,45		ML	ML	ML	ML	ML
0,45 ÷ 0,6		M	M	M	M	M
0,6 ÷ 0,75		M, MH	MH	M	MH	M
0,75 ÷ 0,9		MH, H	MH	MH	MH, H	MH
0,9 ÷ 1		H	H	H	H	H
<b>коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним к.к.д.</b>						
0,7 ÷ 0,74		L	L	L	L	L
0,74 ÷ 0,78		L, ML	L, ML	ML	ML	ML
0,78 ÷ 0,82		ML	ML	M, ML	M	ML, M
0,82 ÷ 0,86		ML, M	M	M	M	M
0,86 ÷ 0,9		M	MH	MH	MH	M, MH
0,9 ÷ 0,95		MH	MH, H	MH, H	MH, H	MH
0,95 ÷ 1		H	H	H	H	H
<b>коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю</b>						
0,7 ÷ 0,74		L	L	L	L	L
0,74 ÷ 0,78		L, ML	ML	L, ML	ML	ML
0,78 ÷ 0,82		ML	M	ML	ML, M	ML
0,82 ÷ 0,86		M	M	M	M	M
0,86 ÷ 0,9		M, MH	M	M, MH	MH	M
0,9 ÷ 0,95		MH	MH	MH, H	MH	MH, H
0,95 ÷ 1		H	H	H	H	H
<b>віброшвидкість</b>						
0 ÷ 2		L	L	L	L	L
2 ÷ 4		ML	ML	ML	ML	ML
4 ÷ 6		ML	ML	M	ML	ML
6 ÷ 8		M	M	M	M	M
8 ÷ 9		M	MH	MH	M, MH	M, MH
9 ÷ 10		MH, H	MH	MH	MH, MH	MH
10 ÷ 12		H	H	H	H	H
<b>вібропереміщення</b>						
0 ÷ 7		L	L	L	L	L
7 ÷ 14		ML, M	ML	ML, M	ML	ML
14 ÷ 21		ML	M	M	M	M
21 ÷ 28		M	M, MH	M, MH	M	M, MH
28 ÷ 35		M, MH	M, MH	MH	MH	MH
35 ÷ 43		MH, H	MH	MH, H	MH, H	H
43 ÷ 50		H	H	H	H	H
<b>узагальнений коефіцієнт технічного стану</b>						
0,5 ÷ 0,57		L	L	L	L	L
0,57 ÷ 0,64		L	L	L, ML	ML	L
0,64 ÷ 0,71		ML, M	ML	ML, M	ML	ML
0,71 ÷ 0,78		M	M	M	M	ML
0,78 ÷ 0,85		M	M	M, MH	MH	M
0,85 ÷ 0,93		MH, H	MH	MH, H	MH	MH
0,93 ÷ 1		H	H	H	H	H

Таблиця 3.5

## Результати обробки експертної інформації

швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі							
ФМ	[0,0.15)	[0.15,0.3)	[0.3,0.45)	[0.45,0.6)	[0.6,0.75)	[0.75,0.9)	[0.9,1)
L	1	0,8	0	0	0	0	0
IL	0	0,6	1	0	0	0	0
M	0	0	0	1	0,6	0	0
Н	0	0	0	0	0,6	1	0
H	0	0	0	0	0	0	1
коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним к.к.д.							
ФМ	[0.7,0.74)	[0.74,0.78)	[0.78,0.82)	[0.82,0.86)	[0.86,0.9)	[0.9,0.95)	[0.95,1)
L	1	0,4	0	0	0	0	0
IL	0	1	0,8	0,2	0	0	0
M	0	0	0,6	1	0,2	0	0
Н	0	0	0	0	0,8	1	0
H	0	0	0	0	0	0,4	1
коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю							
ФМ	[0.7,0.74)	[0.74,0.78)	[0.78,0.82)	[0.82,0.86)	[0.86,0.9)	[0.9,0.95)	[0.95,1)
L	1	0,2	0	0	0	0	0
IL	0	1	0,8	0	0	0	0
M	0	0	0,4	1	0,8	0	0
Н	0	0	0	0	0,6	1	0
H	0	0	0	0	0	0,4	1
віброшвидкість							
ФМ	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,9)	[9,10)	[10,12)
L	1	0	0	0	0	0	0
IL	0	1	0,8	0	0	0	0
M	0	0	0,2	1	0,6	0	0
Н	0	0	0	0	0,8	1	0
H	0	0	0	0	0	0,2	1
вібропереміщення							
ФМ	[0,7)	[7,14)	[14,21)	[21,28)	[28,35)	[35,43)	[43,50)
L	1	0	0	0	0	0	0
IL	0	1	0,2	0	0	0	0
M	0	0,4	0,8	1	0,4	0	0
Н	0	0	0	0,6	1	0,8	0
H	0	0	0	0	0	0,8	1
узагальнений коефіцієнт технічного стану							
ФМ	[0.5,0.57)	[0.57,0.64)	[0.64,0.71)	[0.71,0.78)	[0.78,0.85)	[0.85,0.93)	[0.93,1)
L	1	0,8	0	0	0	0	0
IL	0	0,4	1	0	0	0	0
M	0	0	0,4	1	0,8	0	0
Н	0	0	0	0	0,4	1	0
H	0	0	0	0	0	0,4	1

**Метод парних порівнянь.** Серед методів визначення функцій належності найбільше поширення отримав метод парних порівнянь Сааті [129]. Труднощі використання цього методу зумовлені необхідністю знаходження власного вектора матриці парних порівнянь, що задається за допомогою спеціально запропонованої шкали. Причому ці труднощі зростають по мірі зростання розмірності універсальної множини, на якій задається лінгвістичний терм.

Метод, що пропонується у роботі [129], також використовує матрицю парних порівнянь універсальної множини. Однак, на відміну від методу Сааті, він не вимагає знаходження власного вектора матриці, тобто звільняє дослідника від трудомістких процедур обчислення коренів характеристичного рівняння.

Нехай  $\bar{S}$  - деяка властивість, що розглядається як лінгвістичний терм. Нечітка множина, за допомогою якої формалізується терм  $\bar{S}$ , являє собою сукупність пар [129]:

$$\bar{S} = \left\{ \frac{\mu_S(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_S(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_S(u_q)}{u_q} \right\},$$

де  $\{u_1, u_2, \dots, u_q\} = U$  - множина, на якій задається нечітка множина,  $\bar{S} \subset U$ ;

$\mu_S(u_i)$  - ступінь належності елемента  $u_i \in U$  до нечіткої множини  $\bar{S}$ .

Завдання полягає в тому, щоб визначити значення  $\mu_S(u_i)$  для всіх  $i = \overline{1, q}$ .

Сукупність цих значень і буде утворювати невідому функцію належності.

Метод, що пропонується для розв'язання поставленої задачі, базується на ідеї розподілу ступенів належності елементів універсальної множини відповідно до їх рангів. Ця ідея раніше використовувалася в теорії структурного аналізу систем [129], де розглядаються різні способи визначення рангів елементів.

В нашому випадку під рангом елемента  $u_i \in U$  будемо розуміти число  $r_S(u_i)$ , що характеризує важливість (вагу) цього елемента у формуванні властивості, яка описується нечітким термом  $\bar{S}$ . Припустимо також, що має місце правило: чим більший ранг елемента, тим більша ступінь його належності.

Далі будемо позначати:  $r_S(u_i) = r_i$ ,  $\mu_S(u_i) = \mu_i$ ,  $i = \overline{1, q}$ .

Тоді правило розподілу ступенів належності можна задати у вигляді співвідношення

$$\frac{\mu_1}{r_1} = \frac{\mu_2}{r_2} = \dots = \frac{\mu_q}{r_q}, \quad (3.13)$$

до якого додається умова нормування

$$\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_q = 1. \quad (3.14)$$

Використовуючи співвідношення (3.13), легко визначити ступінь належності всіх елементів універсальної множини через ступінь належності опорного елемента. Якщо опорним є елемент  $u_1 \in U$  із належністю  $\mu_1$ , то

$$\mu_2 = \frac{r_2}{r_1} \cdot \mu_1; \mu_3 = \frac{r_3}{r_1} \cdot \mu_1; \dots; \mu_q = \frac{r_q}{r_1} \cdot \mu_1. \quad (3.15)$$

Для елемента  $u_2 \in U$  з належністю  $\mu_2$  одержуємо

$$\mu_1 = \frac{r_1}{r_2} \cdot \mu_2; \mu_3 = \frac{r_3}{r_2} \cdot \mu_2; \dots; \mu_q = \frac{r_q}{r_2} \cdot \mu_2. \quad (3.16)$$

І для елемента  $u_n \in U$  з належністю  $\mu_n$ , маємо

$$\mu_1 = \frac{r_1}{r_q} \cdot \mu_q; \mu_3 = \frac{r_3}{r_q} \cdot \mu_q; \dots; \mu_{q-1} = \frac{r_{q-1}}{r_q} \cdot \mu_q. \quad (3.17)$$

З огляду на умову (3.14), із співвідношень (3.15)-(3.17) знаходимо

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \left( 1 + \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_3}{r_1} + \dots + \frac{r_q}{r_1} \right)^{-1}; \\ \mu_2 &= \left( \frac{r_1}{r_2} + 1 + \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{r_q}{r_2} \right)^{-1}; \\ \mu_q &= \left( \frac{r_1}{r_q} + \frac{r_2}{r_q} + \frac{r_3}{r_q} + \dots + 1 \right)^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Одержана формула дає можливість обчислити ступені належності  $\mu_y(u_i)$

елементів  $u_i \in U$  до нечіткого терму  $\bar{S}$  двома незалежними шляхами:

- за абсолютними оцінками рівнів  $r_j$ , що визначаються за методиками,

пропонованими у теорії структурного аналізу систем [129]. Для експертних

оцінок рангів можна скористатися дев'ятибальною шкалою (1 - найнижчий ранг, 9 - найвищий ранг) або принципом термометра, запропонованим у [121];

- за відносними оцінками рангів  $r_i/r_j = a_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, q}$ ), що утворюють матрицю

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{r_2}{r_1} & \frac{r_3}{r_1} & \dots & \frac{r_q}{r_1} \\ \frac{r_1}{r_2} & 1 & \frac{r_3}{r_2} & \dots & \frac{r_q}{r_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{r_1}{r_q} & \frac{r_2}{r_q} & \frac{r_3}{r_q} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Ця матриця має такі властивості:

- вона є діагональною, тобто  $a_{ij} = 1$  ( $i, j = \overline{1, q}$ );

- елементи, пов'язані залежністю:  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ;

- матриця  $A$  є транзитивною, тобто  $a_{ik} \cdot a_{ki} = a_{ij}$ , оскільки  $(r_i/r_k) \cdot (r_k/r_j) = r_i/r_j$ .

Наявність цих властивостей призводить до того, що через відомі елементи одного рядка матриці  $A$  легко знайти елементи інших рядків. Якщо відомий  $f$ -й рядок, тобто елементи  $a_{jf}$ ,  $j = \overline{1, q}$ , то шуканий елемент  $a_{ij}$  знаходиться так:

$$a_{ij} = \frac{a_{jf}}{a_{if}}, i, j, f = \overline{1, q}. \quad (3.20)$$

Оскільки матриця (3.19) може бути інтерпретована як матриця парних порівнянь рангів, то для експертної оцінки елементів цієї матриці можна скористатися шкалою Сааті [129]. В нашому випадку ця шкала формулюється так:

$$a_{ij} = \frac{r_i}{r_j} = \begin{cases} 1 - \text{за відсутності переваги } r_j \text{ над } r_i; \\ 3 - \text{за слабкої переваги } r_j \text{ над } r_i; \\ 5 - \text{за суттєвої переваги } r_j \text{ над } r_i; \\ 7 - \text{за явної переваги } r_j \text{ над } r_i; \\ 9 - \text{за абсолютної переваги } r_j \text{ над } r_i; \\ 2, 4, 6, 8 - \text{проміжні порівняльні оцінки.} \end{cases}$$

Таким чином, за допомогою отриманих формул (3.18) експертні знання про ранги елементів або їх парні порівняння перетворюються у функцію належності нечіткого терму.

Головною перевагою запропонованого у роботі [129] методу побудови функції належності є те, що на відміну від відомого методу Сааті [129], він не вимагає розв'язання характеристичного рівняння матриці парних порівнянь при знаходженні елементів їх власного вектора. Крім того, отримані співвідношення дають можливість обчислити функції належності з використанням рангових оцінок, що розроблені в теорії структурного аналізу систем.

Методика побудови функцій належності докладно ілюструється для одного з факторів. Для інших факторів наводяться лише кінцеві результати. При побудові матриць парних порівнянь використовувалися експертні оцінки фахівців.

Для факторів, що мають кількісний характер, діапазон зміни їх значень розбивався на чотири кванти з урахуванням апріорної інформації про сформовані взаємозв'язки між кількісними оцінками і якісними термами. Це забезпечило можливість перетворення неперервної універсальної множини  $U = [\underline{u}, \bar{u}]$  в дискретну п'ятиелементну множину:  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ , де  $u_1 = \underline{u}$ ,  $u_2 = \underline{u} + \Delta_1$ ,  $u_3 = \underline{u} + \Delta_1 + \Delta_2$ ,  $u_4 = \underline{u} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ ,  $u_5 = \underline{u} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = \bar{u}$ , причому  $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = \bar{u} - \underline{u}$  - діапазон зміни параметра. Тому всі матриці парних порівнянь мають розмірність  $5 \times 5$ . Вибір чотирьох квантів обумовлений можливістю апроксимації нелінійних кривих по п'яти точках.

Фактор  $x^{(1)}$  - визначений на універсальній множині  $U(x^{(1)}) = [0; 10]$ .

Для лінгвістичної оцінки фактора використовується сукупність нечітких термів:  $T(x^{(1)}) < \langle \text{«низька»}, \text{«середньо-низька»}, \text{«середня»}, \text{«середньо-висока»}, \text{«висока»} \rangle$ .

Сформуємо матрицю, що відображає парні порівняння терму «низька».

При формуванні матриці експертно визначався лише п'ятий рядок:



$$A^{\text{низька}}(x^{(1)}) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & \square & \square & \square & \square & \square \\ u_2 & \square & \square & \square & \square & \square \\ u_3 & \square & \square & \square & \square & \square \\ u_4 & \square & \square & \square & \square & \square \\ u_5 & 9 & 7 & 5 & 3 & 1 \end{array} \quad (3.21)$$

Елементи інших рядків обчислювалися, виходячи з властивостей, наведених вище.

Оскільки відомими є елементи п'ятого рядка матриці (3.21), то довільний елемент  $a_{ij}$  знаходиться із співвідношення (3.20).

Тоді матриця матиме вигляд:

$$A^{\text{низька}}(x^{(1)}) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 7/9 & 5/9 & 3/9 & 1/9 \\ u_2 & 9/7 & 1 & 8/7 & 3/7 & 1/7 \\ u_3 & 9/5 & 7/5 & 1 & 3/5 & 1/5 \\ u_4 & 9/3 & 7/3 & 5/3 & 1 & 7/3 \\ u_5 & 9 & 7 & 5 & 3 & 1 \end{array} \quad (3.22)$$

Застосовуючи співвідношення (3.18) до матриці  $A^{\text{низька}}(x^{(1)})$ , одержуємо ступені належності елементів  $u_1 \div u_5$  до терму «низька»:  $\mu^{\text{низька}}(u_1) = 0.36$ ,  $\mu^{\text{низька}}(u_2) = 0.28$ ,  $\mu^{\text{низька}}(u_3) = 0.20$ ,  $\mu^{\text{низька}}(u_4) = 0.012$ ,  $\mu^{\text{низька}}(u_5) = 0.004$ .

Аналогічно визначаються матриці парних порівнянь для термів «середньо-низька», «середня», «середньо-висока», «висока»:

$$A^{\text{середньо-низька}}(x^{(1)}) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 9/7 & 1 & 5/7 & 3/7 \\ u_2 & 7/9 & 1 & 7/9 & 5/9 & 3/9 \\ u_3 & 1 & 9/7 & 1 & 5/7 & 3/7 \\ u_4 & 7/5 & 9/5 & 7/5 & 1 & 3/5 \\ u_5 & 7/3 & 9/3 & 7/3 & 5/3 & 1 \end{array} \quad (3.23)$$

$$A^{\text{середня}}(x^{(1)}) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 7/5 & 9/5 & 7/5 & 1 \\ u_2 & 5/7 & 1 & 9/7 & 1 & 5/7 \\ u_3 & 5/9 & 7/9 & 1 & 7/9 & 5/9 \\ u_4 & 5/7 & 1 & 9/7 & 1 & 5/7 \\ u_5 & 1 & 7/5 & 9/5 & 7/5 & 1 \end{array} \quad (3.24)$$

$$A^{\text{середньо-висока}}(x^{(1)}) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 5/3 & 7/3 & 9/3 & 7/3 \\ u_2 & 3/5 & 1 & 7/5 & 9/5 & 7/5 \\ u_3 & 3/7 & 5/7 & 1 & 9/7 & 1 \\ u_4 & 3/9 & 5/9 & 7/9 & 1 & 7/9 \\ u_5 & 3/7 & 5/7 & 1 & 9/7 & 1 \end{array} \quad (3.25)$$

$$A^{\text{висока}}(x^{(1)}) = \begin{array}{c|ccccc} & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline u_1 & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ u_2 & 1/3 & 1 & 5/3 & 7/3 & 9/3 \\ u_3 & 1/5 & 3/5 & 1 & 7/5 & 9/5 \\ u_4 & 1/7 & 3/7 & 5/7 & 1 & 9/7 \\ u_5 & 1/9 & 3/9 & 5/9 & 7/5 & 1 \end{array} \quad (3.26)$$

Застосовуючи співвідношення (3.18) до матриці (3.23), одержуємо ступені належності:  $\mu^{\text{середньо-низька}}(u_1) = 0.226$ ,  $\mu^{\text{середньо-низька}}(u_2) = 0.29$ ,  $\mu^{\text{середньо-низька}}(u_3) = 0.226$ ,  $\mu^{\text{середньо-низька}}(u_4) = 0.16$ ,  $\mu^{\text{середньо-низька}}(u_5) = 0.09$ .

З матриці (3.24) аналогічно одержуємо:  $\mu^{\text{середня}}(u_1) = 0.15$ ,  $\mu^{\text{середня}}(u_2) = 0.22$ ,  $\mu^{\text{середня}}(u_3) = 0.27$ ,  $\mu^{\text{середня}}(u_4) = 0.22$ ,  $\mu^{\text{середня}}(u_5) = 0.15$ .

З матриці (3.25) одержуємо:  $\mu^{\text{середньо-висока}}(u_1) = 0.097$ ,  $\mu^{\text{середньо-висока}}(u_2) = 0.16$ ,  $\mu^{\text{середньо-висока}}(u_3) = 0.023$ ,  $\mu^{\text{середньо-висока}}(u_4) = 0.29$ ,  $\mu^{\text{середньо-висока}}(u_5) = 0.23$ .

З матриці (3.26) одержуємо:  $\mu^{\text{висока}}(u_1) = 0.04$ ,  $\mu^{\text{висока}}(u_2) = 0.12$ ,  $\mu^{\text{висока}}(u_3) = 0.20$ ,  $\mu^{\text{висока}}(u_4) = 0.28$ ,  $\mu^{\text{висока}}(u_5) = 0.36$ .

Отримані значення функцій належності пронормовані на одиницю. В результаті цього швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі представляються у вигляді таких нечітких множин:

$$\text{«низька»} = \left( \frac{1}{1}; \frac{0.78}{2.5}; \frac{0.56}{4}; \frac{0.33}{5.5}; \frac{0.11}{10} \right);$$

$$\text{«середньо-низька»} = \left( \frac{0.779}{1}; \frac{1}{2.5}; \frac{0.779}{4}; \frac{0.551}{5.5}; \frac{0.31}{10} \right);$$

$$\text{«середня»} = \left( \frac{0.56}{1}; \frac{0.81}{2.5}; \frac{1}{4}; \frac{0.81}{5.5}; \frac{0.56}{10} \right)$$

$$\text{«середньо-висока»} = \left( \frac{0.33}{1}; \frac{0.55}{2.5}; \frac{0.79}{4}; \frac{1}{5.5}; \frac{0.79}{10} \right);$$

$$\text{«висока»} = \left( \frac{0.11}{1}; \frac{0.33}{2.5}; \frac{0.56}{4}; \frac{0.78}{5.5}; \frac{1}{10} \right).$$

В додатку Е приведені графіки отриманих нечітких множин.

Для лінгвістичної оцінки факторів  $x^{(2)} - x^{(3)}$  використовується сукупність нечітких термів: <«низький», «середньо-низький», «середній», «середньо-високий», «високий»>.

Ці фактори визначені на універсальній множині  $U(x^{(2)}) = [0.74; 1]$ .

Методом парних порівнянь для термів отримані такі нечіткі множини:

$$\text{«низький»} = \left( \frac{1}{0.74}; \frac{0.78}{0.75}; \frac{0.54}{0.82}; \frac{0.12}{0.9}; \frac{0.02}{0.99} \right);$$

$$\text{«середньо-низький»} = \left( \frac{0.76}{0.74}; \frac{1}{0.75}; \frac{0.76}{0.82}; \frac{0.54}{0.9}; \frac{0.3}{0.99} \right);$$

$$\text{«середній»} = \left( \frac{0.5}{0.74}; \frac{0.88}{0.75}; \frac{1}{0.82}; \frac{0.75}{0.9}; \frac{0.45}{0.99} \right);$$

$$\text{«середньо-високий»} = \left( \frac{0.32}{0.74}; \frac{0.56}{0.75}; \frac{0.8}{0.82}; \frac{1}{0.9}; \frac{0.78}{0.99} \right);$$

$$\text{«високий»} = \left( \frac{0.27}{0.74}; \frac{0.43}{0.75}; \frac{0.63}{0.82}; \frac{0.92}{0.9}; \frac{1}{0.99} \right).$$

Отримані нечіткі множини описуються графіками рис. б, в (дод. Е).

Для лінгвістичної оцінки факторів  $x^{(4)} - x^{(5)}$  використовуються нечіткі терми: <«низька», «середньо-низька», «середня», «середньо-висока», «висока»>.

Фактор  $x^{(4)}$  визначений на універсальній множині  $U(x^{(4)}) = [0; 12]$ .

Для цього фактора методом парних порівнянь отримані нечіткі множини:

$$\text{«низька»} = \left( \frac{1}{1}; \frac{0.83}{4}; \frac{0.54}{6}; \frac{0.23}{10}; \frac{0.1}{12} \right);$$

$$\text{«середньо-низька»} = \left( \frac{0.77}{1}; \frac{1}{4}; \frac{0.77}{6}; \frac{0.55}{10}; \frac{0.3}{12} \right);$$

$$\text{«середня»} = \left( \frac{0.48}{1}; \frac{0.84}{4}; \frac{1}{6}; \frac{0.83}{10}; \frac{0.47}{12} \right);$$

$$\text{«середньо-висока»} = \left( \frac{0.3}{1}; \frac{0.55}{4}; \frac{0.8}{6}; \frac{1}{10}; \frac{0.8}{12} \right);$$

$$\text{«висока»} = \left( \frac{0.27}{1}; \frac{0.46}{4}; \frac{0.72}{6}; \frac{0.92}{10}; \frac{1}{12} \right).$$

Отримані нечіткі множини описуються графіками рис. г (дод. Е).

Фактор  $x^{(5)}$  визначений на універсальній множині  $U(x^{(5)}) = [0; 50]$ .

Для цього фактора отримані такі нечіткі множини:

$$\text{«низька»} = \left( \frac{1}{5}; \frac{0.74}{15}; \frac{0.35}{25}; \frac{0.2}{40}; \frac{0.1}{50} \right);$$

$$\text{«середньо-низька»} = \left( \frac{0.768}{5}; \frac{1}{15}; \frac{0.765}{25}; \frac{0.54}{40}; \frac{0.31}{50} \right);$$

$$\text{«середня»} = \left( \frac{0.55}{5}; \frac{0.88}{15}; \frac{1}{25}; \frac{0.9}{40}; \frac{0.55}{50} \right);$$

$$\text{«середньо-висока»} = \left( \frac{0.35}{5}; \frac{0.565}{15}; \frac{0.78}{25}; \frac{1}{40}; \frac{0.79}{50} \right);$$

$$\text{«висока»} = \left( \frac{0.11}{5}; \frac{0.24}{15}; \frac{0.47}{25}; \frac{0.83}{40}; \frac{1}{50} \right).$$

Отримані нечіткі множини описуються графіками на рис. д (дод. Е).

Для лінгвістичної оцінки фактора  $k^T$  використовуються нечіткі терми:

«низький», «середньо-низький», «середній», «середньо-високий», «високий».

Цей фактор визначений на універсальній множині  $U(k^T) = [0.5; 1]$ .

Методом парних порівнянь для термів отримані такі нечіткі множини:

$$\text{«низький»} = \left( \frac{1}{0.5}; \frac{0.73}{0.68}; \frac{0.64}{0.82}; \frac{0.15}{0.9}; \frac{0.04}{1} \right);$$

$$\text{«середньо-низький»} = \left( \frac{0.78}{0.5}; \frac{1}{0.68}; \frac{0.75}{0.82}; \frac{0.6}{0.9}; \frac{0.24}{1} \right);$$

$$\text{«середній»} = \left( \frac{0.49}{0.5}; \frac{0.9}{0.68}; \frac{1}{0.82}; \frac{0.7}{0.9}; \frac{0.34}{1} \right);$$

$$\text{«середньо-високий»} = \left( \frac{0.3}{0.5}; \frac{0.6}{0.68}; \frac{0.74}{0.82}; \frac{1}{0.9}; \frac{0.7}{1} \right);$$

$$\text{«високий»} = \left( \frac{0.3}{0.5}; \frac{0.4}{0.68}; \frac{0.64}{0.82}; \frac{0.9}{0.9}; \frac{1}{1} \right).$$

Отримані нечіткі множини описуються графіками рис. е (дод. Е).

На основі даних таблиці 3.5 та отриманих значень нечітких множин за методом парних порівнянь, були побудовані усереднені функції належності

термів вхідних та вихідного параметрів (дод. Ж), створені відповідності між функціями належності  $\mu_{li}$ , та правилами керування  $P_{li}$ . а основі переліку відповідностей сформульовано правила згідно правил Л. Заде і приведені в додатку 3.

Всього база знань може місти 3125 правил. Проте з розгляду були вилучені правила, в яких хоча б один із вхідних параметрів приймає значення L (для параметрів «коефіцієнт технічного стану нагнітача» та «коефіцієнт технічного стану ГТД») чи значення Н (для параметрів «швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі», «віброшвидкість» та «вібропереміщення»). При цьому вважається, що технічний стан обладнання незадовільний, і подальші розрахунки не проводяться. Після цих вилучень база правил містить 1020 правил.

Було синтезовано структуру типу Мамдані в системі MATLAB (рис. 3.2) і за результатами її роботи зформовано масив значень узагальненого коефіцієнту технічного стану.

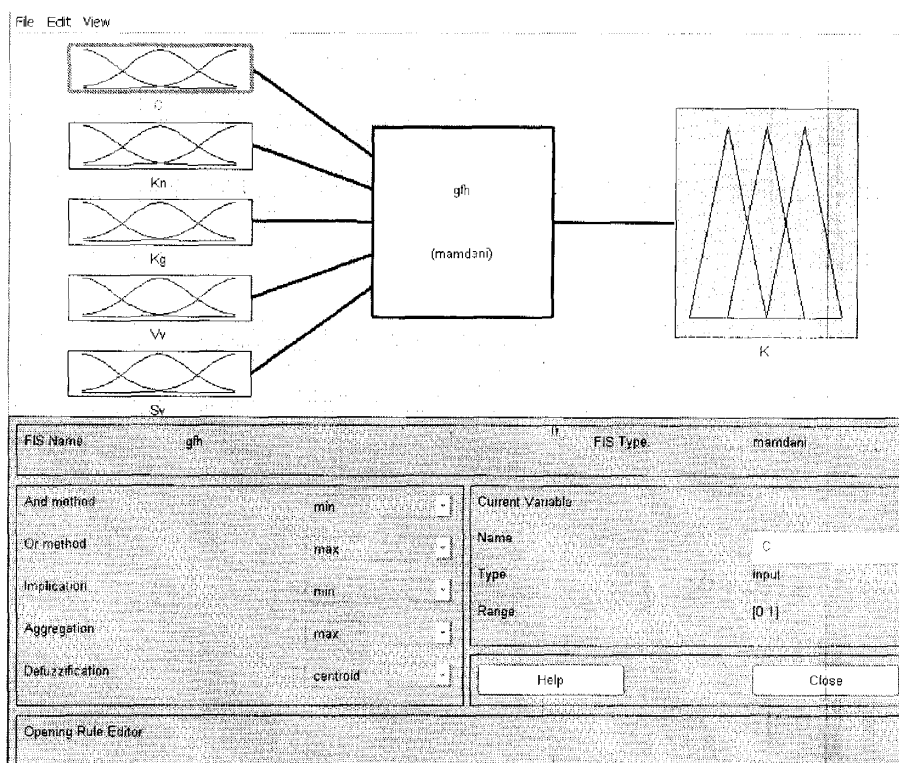


Рис. 3.2. Fuzzy модель Мамдані у програмному середовищі Matlab

**Метод нечіткої кластеризації.** Концептуальний зв'язок між кластерним аналізом і теорією нечітких множин оснований на тому, що при розв'язуванні задач структуризації складних систем більшість класів, що формуються, «розмиті» за своєю природою. Тому, найбільш адекватну відповідь слід шукати не на питання «Чи належить елемент до того чи іншого класу?», а на питання «В якій степені даний елемент належить класу, що розглядається?».

Методи нечіткої кластеризації вводять до розгляду нечіткі кластери і відповідні їм функції належності, які приймають значення з інтервалу  $[0,1]$ .

Таким чином, задача нечіткої кластеризації полягає у тому, що необхідно знайти нечітке розбиття або нечітке покриття множини елементів сукупності, що досліджується. Задача зводиться до знаходження степеня належності елементів множини нечітким кластерам [142].

Нехай початкова сукупність даних представляє собою скінчену множину елементів  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Вводиться множина ознак об'єктів  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_q\}$ , кожний з яких є деякою характеристикою елементів множини  $A$ .

Далі пропонується, що для всіх елементів множини об'єктів кластеризації виміряли всі ознаки множини  $P$ , і кожен елемент множини  $a_i \in A$  представлений вектором  $x_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^q\}$ , де  $x_i^j \in R$  - дійсне значення ознаки  $p_j \in P$  для об'єкту  $a_i \in A$ .

Взагалі, проблема кількісного вимірювання ознак кожного об'єкта з сукупності – нетривіальна і самостійна задача. Процес вимірювання ознак може бути реалізований в різних шкалах, кожна з яких характеризується допустимим перетворенням даних. В зв'язку з цим, визначають різні типи шкал [142]:

- шкала найменувань: об'єкту ставиться у відповідність деякий символ або номер, який лише відокремлює одне значення ознаки від іншого;
- порядкова шкала: разом з відповідною множиною символічних ознак об'єктів ця шкала дозволяє встановити відношення порядку відносно цієї ознаки;

оді об'єкту ставиться у відповідність деяке число, яке відіграє роль його оцінки в балах;

- інтервальна шкала: крім порядку елементів за ознаками ця шкала встановлює рівність інтервалів значень цієї ознаки; об'єкту, як правило, ставиться у відповідність число, яке дорівнює значенню цієї ознаки; допустимим перетворенням тут є довільна лінійна зростаюча функція між двома множинами значень ознак;

- шкала відношень: в доповнення до рівності інтервалів додає ще рівність відношень значень ознаки, що розглядається; об'єкту ставиться у відповідність деяке число, яке дорівнює значенню цієї ознаки.

Множину ознак слід обирати таким чином, щоб всі  $x_j^i \in R$  були вимірні в шкалах відношень чи інтервалів. Саме в такому випадку результати нечіткої кластеризації мають змістовну інтерпретацію, яка адекватна проблемі знаходження нечітких кластерів.

Вектори значень ознак  $x_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^q\}$  зручно представляти у вигляді матриці даних  $D$  розмірності  $(n \times q)$ , кожний рядок якої представляє собою значення вектора  $x_i$ .

Отже, задача нечіткого кластерного аналізу формулюється наступним чином [142]: на основі даних матриці  $D$  визначити таке нечітке розбиття  $R(A) = \{A_k \mid A_k \subseteq A\}$  або нечітке покриття  $J(A) = \{A_k \mid A_k \subseteq A\}$  множини  $A$  на задане число нечітких кластерів  $A_k (k \in \{2, \dots, c\})$ , яке доставляє екстремум деякій цільовій функції  $F(R(A))$  серед усіх нечітких розбиттів чи екстремум цільової функції  $F(J(A))$  серед всіх можливих нечітких покриттів.

Одним з видів конкретизації цієї задачі є використання спеціальної функції `fcm` системи MATLAB, який оснований на алгоритмі розв'язування методом нечітких  $c$ -середніх.

Для уточнення вигляду цільової функції  $F(J(A))$  вводяться деякі додаткові поняття. По-перше, пропонується, що шукані нечіткі кластери

представляють собою нечіткі множини  $A_k (k \in \{2, \dots, c\})$ , які є нечітким покриттям початкової множини об'єктів кластеризації  $A$ , для якої має місце наступна умова [142]:

$$\sum_{k=1}^c \mu_{A_k}(a_i) = 1, (\forall a_i \in A),$$

де  $c$  – загальна кількість нечітких кластерів  $A_k (k \in \{2, \dots, c\})$ , яке вважається попередньо заданим.

Далі для кожного кластеру вводяться так звані типові представники або центри  $v_k$  шуканих нечітких кластерів  $A_k (k \in \{2, \dots, c\})$ , які розраховуються за наступною формулою:

$$v_j^k = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{A_k}(a_i))^m x_i^j}{\sum_{i=1}^n (\mu_{A_k}(a_i))^m}, (\forall k \in \{2, \dots, c\}, \forall p_j \in P),$$

де  $m$  – параметр, який має назву експоненційна вага і дорівнює деякому дійсному числу ( $m > 1$ ).

Кожний з центрів кластерів є вектором  $v_k = (v_k^1, v_k^2, \dots, v_k^q)$  в деякому  $q$ -вимірному нормованому просторі ознак, який ізоморфний  $R^q$ , якщо всі ознаки виміряні за шкалою відношень.

Як цільова функція розглядається сума квадратів зважених відхилень координат об'єктів кластеризації від центрів нечітких кластерів [142]:

$$F(A_k, v_k^j) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c (\mu_{A_k}(a_i))^m \sum_{j=1}^q (x_i^j - v_k^j)^2.$$

Таким чином, мінімізація цільової функції мінімізує відхилення всіх об'єктів кластеризації від центрів нечітких кластерів пропорційно значенням функцій належності цих об'єктів відповідним нечітким кластерам.

Ця функція не є випуклою, а тому задача кластеризації в загальному випадку відноситься до багатоекстремальних задач нелінійного програмування.



У випадку, якщо заздалегідь невідома кількість кластерів  $c$ , слід використати метод субтрактивної кластеризації. Ідея цього методу полягає у тому, що кожна точка даних пропонується як центр потенційного кластеру. Далі вираховуються деякі міри можливості кожної точки даних представляти центр кластеру. Ця кількісна міра основана на оцінці густини точок навколо відповідного центра кластера.

Цей алгоритм, який є узагальненням методу кластеризації Р. Ягера [142], заснований на виконанні наступних кроків:

- 1) вибрати точку даних з максимальним потенціалом для представлення центру першого кластеру;
- 2) зібрати всі точки даних в околі центру даного кластеру, величина якої задається параметром  $radii$ , щоб визначити наступний нечіткий кластер і координати його центру.

Далі, ці дві процедури повторюються до тих пір, доки всі точки даних не будуть лежати в границях околів радіуса  $radii$  навколо шуканих кластерів.

Функція командного рядка системи MATLAB

$[C, S] = \text{subclust}(X, radii, xBounds, options)$

знаходить центри таких кластерів.

При цьому матриця  $X$  містить об'єкти кластеризації, кожний рядок якої відповідає координатам окремої точки даних. Параметр  $radii$  являє собою вектор, компоненти якого приймають значення з інтервалу  $[0,1]$  і задають діапазон розрахунку центрів кластерів. Робиться припущення, що всі дані знаходяться в деякому гіперкубі. Взагалі, малі значення параметрів  $radii$  призводять до знаходження малого числа великих за кількістю точок кластерів. Найкращих результатів можна очікувати при значенні  $radii$  між 0.2 і 0.5.

Аргумент  $xBounds$  є матрицею розміром  $(2 \times q)$ , яка визначає засіб відображення матриці даних  $X$  в деякому одиничному гіперкубі. Тут  $q$  – кількість ознак. Цей аргумент є необов'язковим, якщо матриця  $X$  вже нормована. Перший рядок цієї матриці містить мінімальні значення інтервалу вимірювання

кожної ознаки, а другий рядок – максимальне значення вимірювання ознаки.

Функція `subclust` повертає матрицю  $S$  значень координат центрів нечітких кластерів. При цьому кожний рядок цієї матриці містить координати одного центру кластеру. Вектор  $S$  містить  $\sigma$ -значення, які визначають діапазон впливу центра кластеру по кожній з розглянутих ознак. При цьому, всі центри кластерів мають однакову множину  $\sigma$ -значень.

З використання функції `subclust` було проведено субтрактивну кластеризацію вихідних даних, які характеризують технічний стан газоперекачувальних агрегатів. Отримана кількість кластерів, яка рівна 3. На рис. 3.3 представлені результати кластеризації для даних "узагальнений коефіцієнт технічного стану" – «швидкість накопичення продуктів спрацювання в оливі». Центри отриманих кластерів є центрами термів відповідних функцій належності.

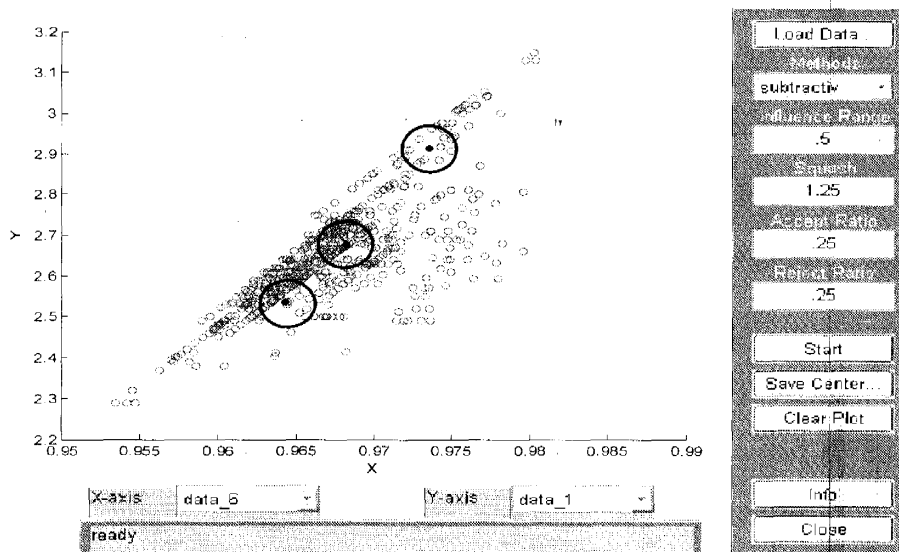


Рис. 3.3. Кластеризація вихідних даних

За результатами субтрактивної кластеризації в системі MATLAB можна згенерувати нечітку систему типу Сугено з використанням функції [143]

$$fismat = genfis2(Xin, Xout, radii).$$

При цьому  $Xin$  – матриця значень вхідних параметрів,  $Xout$  – вектор значень узагальненого коефіцієнта технічного стану. Значення параметра  $radii$  беруться з попереднього етапу кластеризації.

Позначимо через  $V_1, V_2, \dots, V_c$  центри кластерів, які є результатом субтрактивної кластеризації. Для спрощення, приймемо, що центри кластерів задані двома координатами:  $V_i = (x_i, y_i)$ . Задача полягає в синтезі нечітких правил, які пов'язують вхід  $x_i$  із виходом  $y_i$ .

Центру кластера ставиться у відповідність одне нечітке правило

$$\text{ЯКЩО } x = \tilde{x}_i \text{ то } y = \tilde{y}_i,$$

в якому нечіткі терми інтерпретуються так:  $\tilde{x}_i$  - "біля  $x_i$ ",  $\tilde{y}_i$  - "біля  $y_i$ ". Функції належності цих нечітких термів задаються гаусівською кривою [143]:

$$\tilde{x}_i = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{\beta}\right)^2\right), \quad \tilde{y}_i = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y-y_i}{\beta}\right)^2\right), \quad i = \overline{1, c},$$

де  $\beta$  - параметр алгоритму субтрактивної кластеризації.

Результати побудови функцій належності вхідних параметрів та зформованої бази правил представлені в додатку К.

Проте отримана нечітка система з одним вихідним параметром може розглядатись тільки як вихідна нечітка система для ANFIS-навчання.

ANFIS – це, так звана, адаптивна системи нейро-нечіткого виводу, яка реалізована у формі гібридної мережі у пакеті Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB.

**Гібридна мережа** є багатошаровою нейронною мережею спеціальної структури без зворотних зв'язків, у якій використовуються звичайні (не нечіткі) сигнали, ваги і функції активації, а виконання операції підсумовування, засновано на використанні фіксованої Т-норми, Т-конорми чи деякої іншої неперервної операції [142]. При цьому значення входів, виходів і ваг гібридної нейронної мережі є дійсними числа з інтервалу  $[0, 1]$ .

Основна ідея, покладена в основу моделі гібридних мереж, полягає в тому, щоб використовувати існуючу вибірку даних для визначення параметрів функцій належності, що найкраще відповідають деякій системі нечіткого висновку. При цьому для знаходження параметрів функцій належності

використовуються відомі процедури навчання нейронних мереж.

З одного боку, гібридна мережа ANFIS - це нейронна мережа з єдиним виходом і декількома входами, що є нечіткими лінгвістичними змінними. При цьому терми вхідних лінгвістичних змінних описуються стандартними для системи MATLAB функціями належності, а терми вихідної змінної представляються лінійною чи постійною функцією належності.

З іншого боку, мережа ANFIS - це систему нечіткого висновку FIS типу Сугено нульового чи першого порядку, у якій кожне з правил нечітких продукцій має постійну вагу, рівну одиниці. У системі MATLAB користувач має можливість редагувати і налаштовувати гібридні мережі ANFIS, використовуючи засоби пакету Fuzzy Logic Toolbox [143].

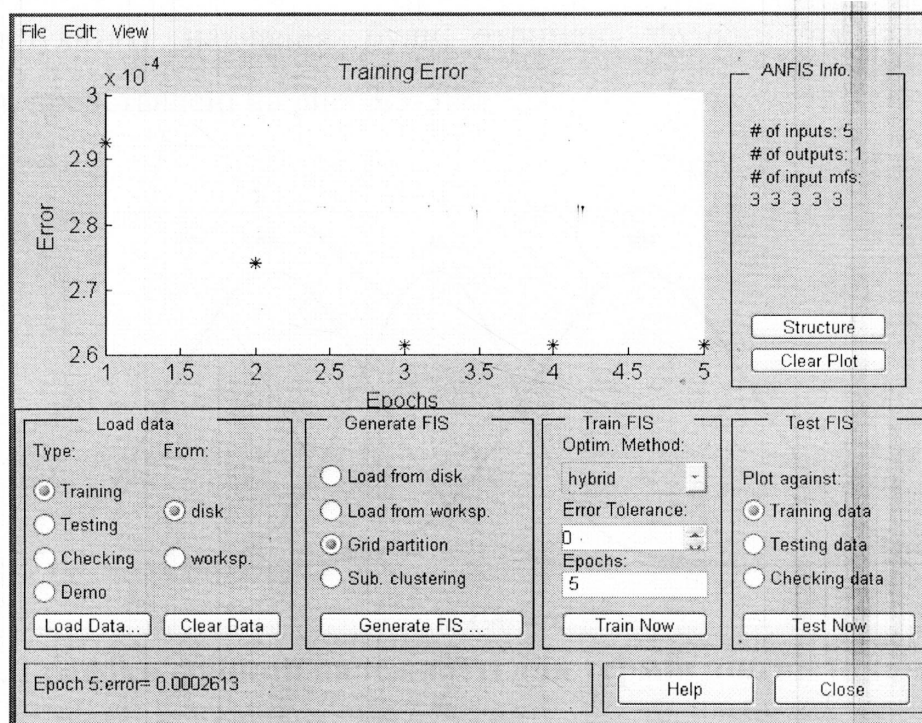
Загальна послідовність процесу розробки моделі гібридної мережі може бути представлена в наступному вигляді [142].

**Крок 1.** Головне меню редактора ANFIS (рис. 3.4) призначене для роботи з попередньо створеною системою нечіткого висновку. Для створення гібридної мережі необхідно завантажити дані.

**Крок 2.** Для початку за допомогою редактора m-файлів або будь-якого текстового редактору необхідно підготувати навчальні дані.

Взагалі, вхідні дані представляють собою звичайну числову матрицю розмірності  $m \times (n+1)$ , у якій кількість рядків  $m$  відповідає обсягу вибірки, перші  $n$  стовпців — значенням вхідних змінних моделі, а останній стовпчик — значенню вихідної змінної.

Початкові дані, що завантажуються, можуть бути одного з наступних типів: навчальні дані (Training) — обов'язкові дані, що використовуються для побудови гібридної мережі; тестові дані (Testing) — необов'язкові дані, що використовуються для тестування побудованої гібридної мережі з метою перевірки якості функціонування побудованої гібридної мережі; перевірочні дані (Checking) — необов'язкові дані, що використовуються для перевірки побудованої гібридної мережі з метою з'ясування факту перенавчання мережі.



**Рис. 3.4. Графічний інтерфейс редактора ANFIS**

**Крок 3.** Перед навчанням гібридної мережі необхідно задати параметри навчання, для чого варто скористатися наступною групою опцій у правій нижній частині робочого вікна (рис. 3.4):

1. Вибрати метод навчання гібридної мережі — гібридний (hybrid), що представляє собою комбінацію методу найменших квадратів і методу спадання зворотного градієнта.
2. Установити рівень помилки навчання (Error Tolerance).
3. Задати кількість циклів навчання (Epochs).
4. Для навчання мережі натиснути кнопку Train Now. При цьому хід процесу навчання ілюструється у вікні візуалізації у формі графіка — залежність помилки від кількості циклів навчання.

**Крок 4.** Подальше настроювання параметрів побудованої і навченої гібридної мережі може бути виконане за допомогою стандартних графічних засобів пакета Fuzzy Logic Toolbox. Можна працювати зі структурою системи нечіткого висновку безпосередньо в редакторі ANFIS.

Аналіз адекватності побудованої моделі можна виконати за допомогою перегляду правил відповідної системи нечіткого висновку.

В результаті навчання були отримані функції належності вхідних параметрів, представлені на рис. 3.5-3.9.

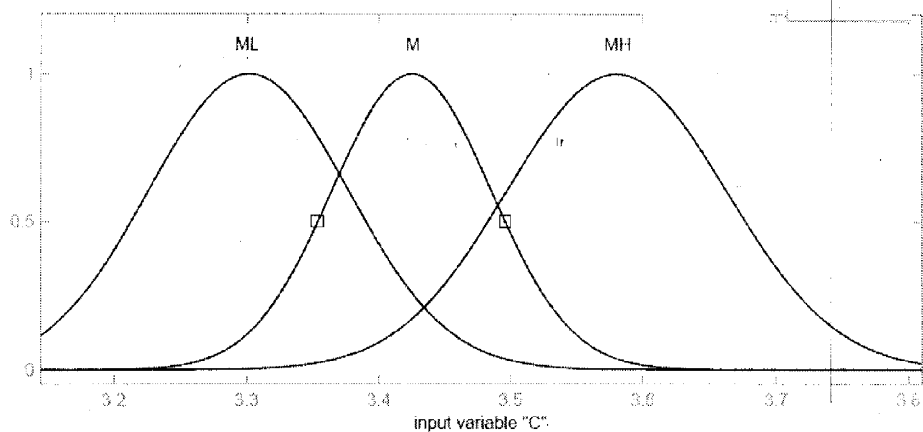


Рис. 3.5. Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $C_i$

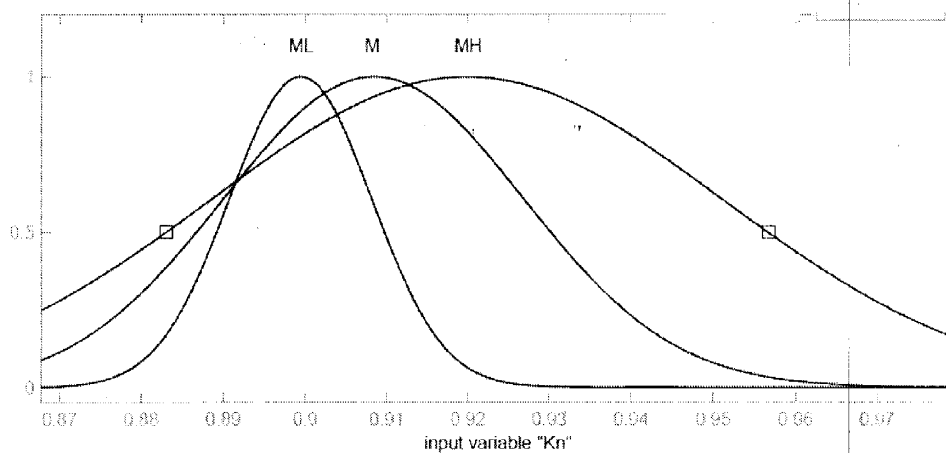


Рис. 3.6. Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(n)}$

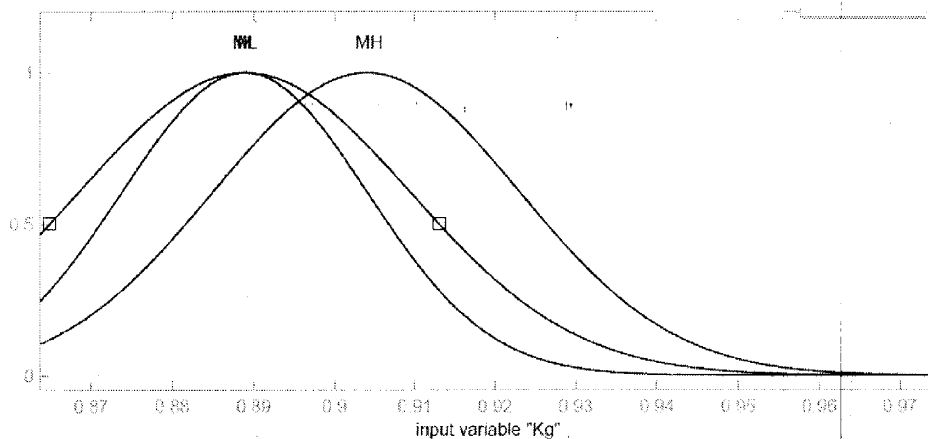


Рис. 3.7. Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(r)}$

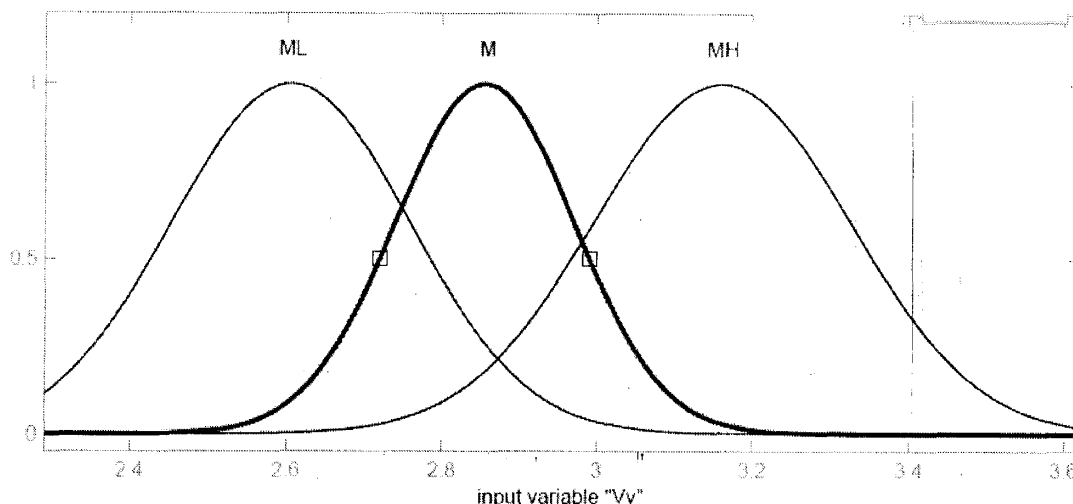


Рис. 3.8. Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $V_i^{(v)}$

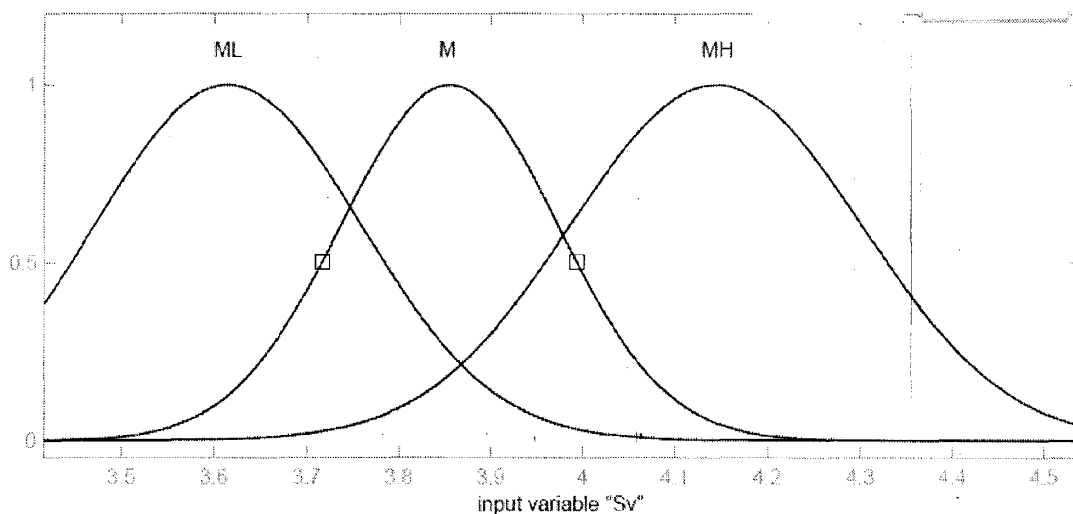


Рис. 3.9. Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $S_i^{(v)}$

Використовуючи розроблену нечітку структуру типу Сугено ранжирування ГПА за технічним станом (рис. 3.10) розглянемо приклад її використання при розрахунку коефіцієнту технічного стану для випадку, коли швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі рівна 3,5 мг/год; коефіцієнт технічного стану нагнітача – 0,95; коефіцієнт технічного стану ГТД – 0,95; віброшвидкість – 2,3 мм/с; вібропериміщення – 3,4 мк.

Активними вважаються правила, в яких використовуються відповідні підумови і ці правила використовуються в процесі нечіткого висновку (рис. 3.11).

Результатом рішення задачі нечіткого висновку є число 0.96, яке вказує на те, що значення узагальненого коефіцієнта технічного стану ГПА рівне  $k_i^T=0,96$  (рис. 3.12).

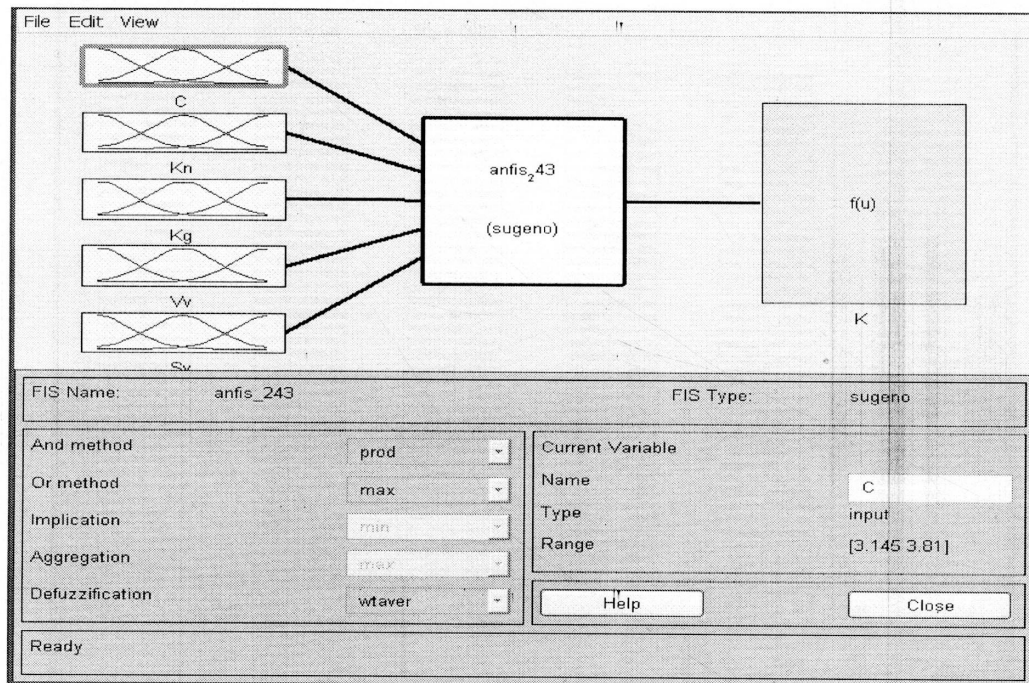


Рис. 3.10. Визначення коефіцієнту технічного стану нагнітача у програмному середовищі Matlab

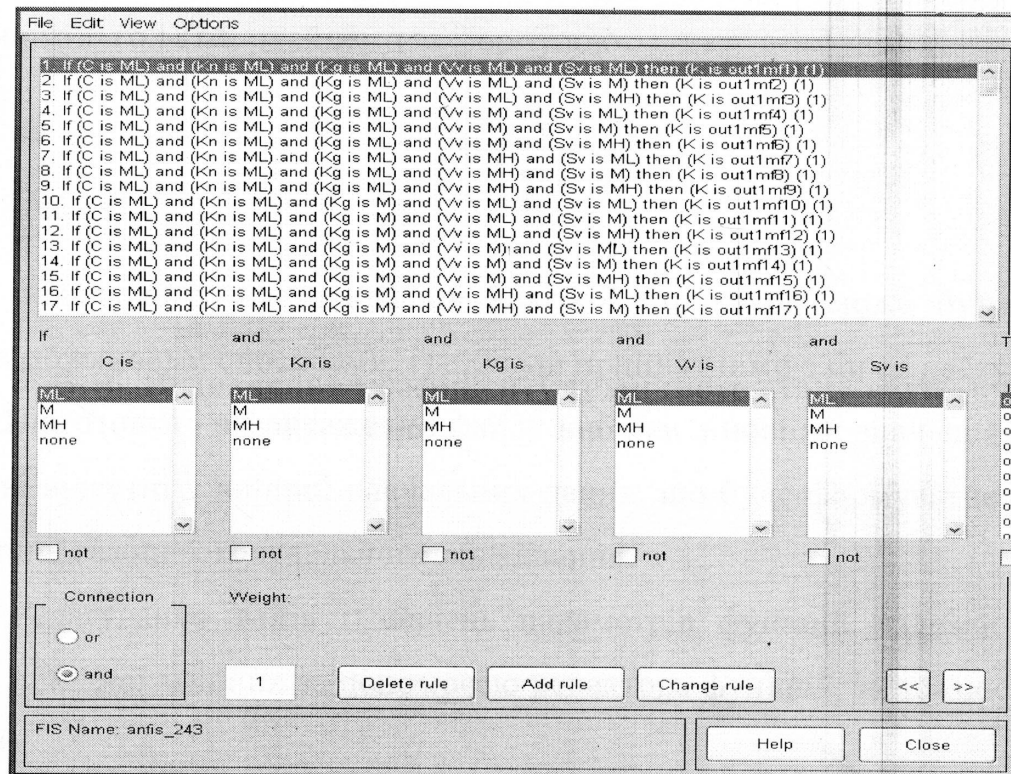
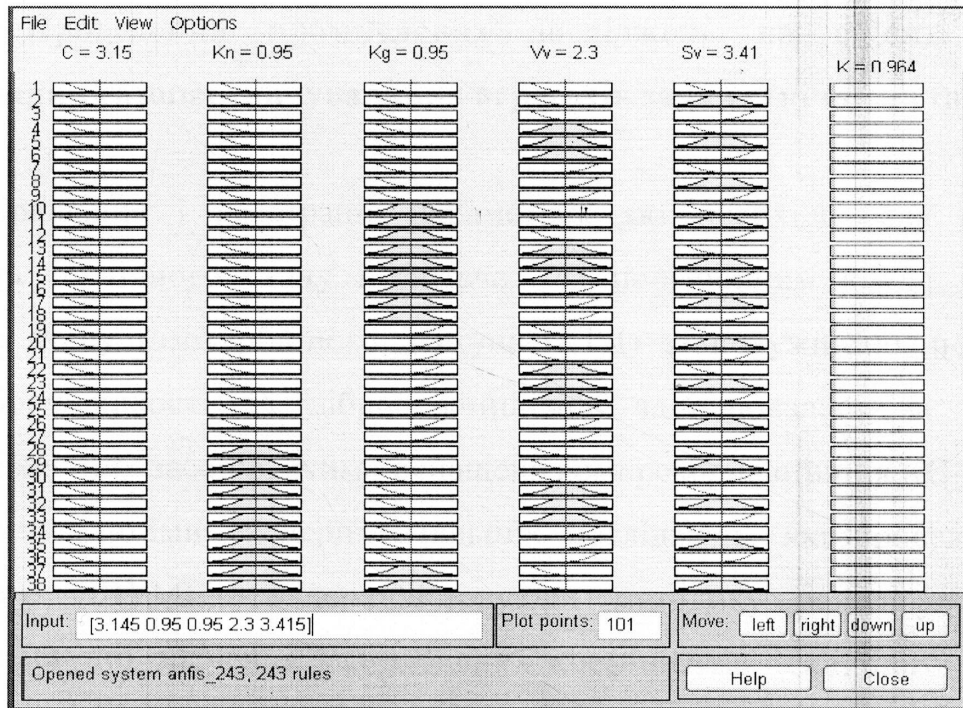


Рис. 3.11. База правил нечітких продукцій у середовищі Matlab





**Рис. 3.12.** Значення узагальненого коефіцієнту технічного стану ГПА

Аналогічну процедуру ранжирування можна здійснити і для інших газоперекачувальних агрегатів природного газу. Тоді коефіцієнти завантаження для кожного  $i$ -го ГПА, знайдемо за формулою

$$k_i = \frac{k_i^T}{\sum_{i=1}^m k_i^T} \quad (3.27)$$

В подальшому настроювання нечіткої структури може бути виконане кількома можливими способами. Найбільш прийнятними з них є наступні.

1. Підготовка і завантаження файлу вибірки з новими значеннями вхідних даних, які відсутні у вибірці навчальних даних, що буде формуватись в процесі експлуатації газоперекачувального обладнання.

2. Редагування типів і значень параметрів функцій належності термів вхідної і вихідної змінних за допомогою редактора функцій належності системи MATLAB.

Всебічна і повна оцінка проблемної ситуації дозволить розробити адекватну модель розв'язку конкретної задачі нечіткого керування чи прийняття рішень.

### 3.4. Проведення промислових досліджень на об'єкті з метою ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом

Вимірювання і реєстрація параметрів, які необхідні для обчислення коефіцієнта технічного стану нагнітача за політропним к.к.д., коефіцієнта технічного стану газотурбінного двигуна (ГТД) за потужністю, політропного к.к.д., віброшвидкості та вібропереміщення здійснювалась за допомогою штатних технічних засобів, якими оснащена компресорна станція КС-3.

За результатами експериментальних досліджень, які проведені на КС Долинського ЛВУМГ, та використовуючи методику ранжирування, були отримані наступні значення узагальнених коефіцієнтів технічного стану ГПА протягом періоду проведення досліджень з 2004 по 2007рр. (табл. 3.6).

**Таблиця 3.6**

#### Значення узагальнених коефіцієнтів технічного стану ГПА

№ ГПА	Тип ГПА	$K_i^T$
1	16ГЦ2-395/53-66	0,927
2	16ГЦ2-395/53-766	0,947
3	16ГЦ2-395/53-766	0,943
4	16ГЦ2-395/53-766	0,939
5	16ГЦ2-395/53-766	0,923

За формулою (3.27) визначимо коефіцієнти завантаження нагнітачів для випадку, коли працюють другий, третій та четвертий нагнітачі (і забезпечують задану продуктивність КС):

$$k_2 = 0,3347; k_3 = 0,3333; k_4 = 0,3318.$$

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

В даному розділі запропоновано метод ранжирування газоперекачувального обладнання за його технічним станом на базі нечіткої логіки, що допоможе ефективніше, на базі відповідного інформаційного забезпечення, керувати процесом компримування природного газу.

1. Основними параметрами, що визначають технічний стан ГПА вибрано швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі, коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним к.к.д., коефіцієнт технічного стану газотурбінного двигуна (ГТД) за потужністю, віброшвидкість та вібропереміщення, які в повному обсязі характеризують технічний стан газоперекачувального обладнання.

2. Визначені функції належності для кожного із вибраних параметрів. Проведено відповідності між функціями належності, правилами керування та лінгвістичними формулюваннями, які характеризують технічний стан газоперекачувального обладнання

3. Запропоновано структуру системи в яку входить база знань, механізм логічного висновку, підсистема набуття знань і діалоговий інтерфейс користувача, що дозволяє одночасно з детермінованою інформацією використовувати нечітку логіку і провести ранжирування обладнання.

4. Запропонований метод ранжирування ГПА дає змогу визначити: показники ефективності функціонування та діагностичні показники стану ГПА; показники технічного стану ГПА; показники ефективності роботи компресорних цехів. Він може бути використаний у керуванні режимами транспорту газу, в режимно-технологічних розрахунках та при визначенні залишкового ресурсу ГПА.

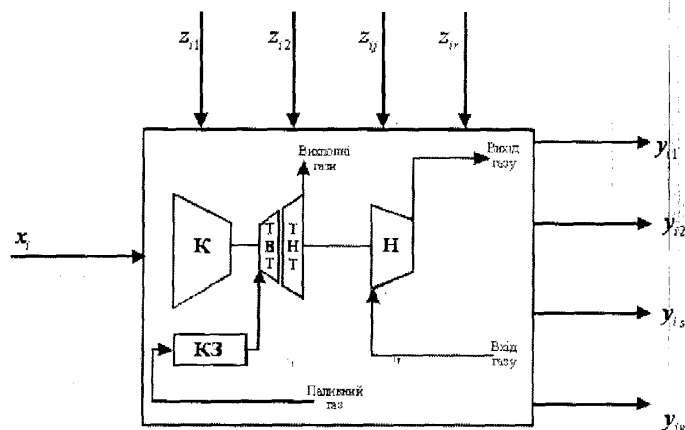
## РОЗДІЛ 4

### ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПРИМУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

#### 4.1. Обґрунтування та вибір методу побудови математичних моделей процесу компримування природного газу

Для вирішення задачі оптимального керування процесом компримування природного газу актуальною є побудова адекватних процесу математичних моделей на основі експериментального спостереження за роботою ГПА на режимах їх нормальної експлуатації.

Розглянемо  $i$ -й ГПА, як об'єкт, який характеризується керуючою дією  $x_i$  та впливами зовнішнього середовища  $z_{ij}$ , де  $j$  - номер зовнішнього впливу для  $i$ -го нагнітача;  $j = \overline{1, r}$ ;  $r$  - кількість зовнішніх впливів (рис. 4.1).



**Рис. 4.1.** Газоперекачувальний агрегат, як об'єкт керування

Сукупність величин  $x_i$  та  $z_{ij}$  утворюють групу вхідних величин ГПА (об'єкта керування). Реакція керованого об'єкта на вхідні величини характеризується певними показниками роботи нагнітача – вихідними величинами  $y_{is}$ ,  $s = \overline{1, v}$ , де  $v$  - кількість вихідних величин.

Для нагнітачів з газотурбінним приводом (ГТП) вихідними величинами будуть [23, 144]:

- витрата паливного газу;
- температура газу на виході із нагнітача;
- температура газів на виході ТНТ;
- продуктивність нагнітача.

Кожна із перерахованих вихідних величин є функцією керуючої дії  $x_i$  та зовнішніх впливів  $z_i$ ,

$$y_{is} = f_{is}(x_i, \bar{z}_i), \quad (4.1)$$

де  $\bar{z}_i$  - вектор зовнішніх впливів  $i$ -го нагнітача.

Керуючою дією є частота обертання вала нагнітача -  $n_n$ .

Проведений аналіз літературних джерел і роботи компресорних станцій виявив [23, 144, 145], що для нагнітачів з ГТП зовнішніми впливами є - температура газу на вході в нагнітач  $T_m$ , ступінь підвищення тиску газу  $\varepsilon$ , тиск газу на вході в нагнітач  $P_m$ , температура  $T_c$  та тиск  $P_c$  навколишнього середовища.

Тоді, для витрати паливного газу  $G$ , температури газу на виході нагнітача  $T_{out}$  та продуктивності нагнітача  $Q$  отримаємо:

$$G = f_1(n_n, T_m, \varepsilon, P_m, T_c, P_c),$$

$$T_{out} = f_2(n_n, T_m, \varepsilon, P_m, T_c, P_c),$$

$$Q = f_3(n_n, T_m, \varepsilon, P_m, T_c, P_c),$$

або "

$$\{G, T_{out}, Q\} = f_i(n_n, T_m, \varepsilon, P_m, T_c, P_c), \quad i = \overline{1,3}. \quad (4.2)$$

А залежність температури газів на виході ТНТ матиме вигляд:

$$T_v = f_4(n_n, \varepsilon, P_m, T_c, P_c). \quad (4.3)$$

Відмітимо, що на відміну від роботи [23] в математичні моделі включений тиск навколишнього середовища.

Тепер потрібно за результатами експериментальних досліджень ідентифікувати залежності (4.2) – (4.3). Вони можуть бути подані як функціональні залежності між вхідними величинами  $\bar{u}^T = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  і виходами багатовимірного об'єкта  $\bar{y}^T = (y_1, y_2, \dots, y_m)$

$$\bar{Y} = \bar{\varphi}(\bar{u}),$$

де  $\bar{\varphi}^T(\bar{u}) = (\varphi_1(\bar{u}), \varphi_2(\bar{u}), \dots, \varphi_k(\bar{u}))$  – невідома вектор-функція;

$\bar{u}^T = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  – вектор екзогенних змінних, який містить керуючі та зовнішні впливи.

В дійсності вихід об'єкта  $\bar{Y}$  спотворений перешкодою  $\bar{e}$ . Тому спостереженню доступна інша функція  $\bar{\bar{Y}} = \bar{\bar{\varphi}}(\bar{u}, \bar{e})$ . Як правило, допускають, що перешкода  $\bar{e}$  є адитивною по відношенню до виходу  $\bar{Y}$ , тобто

$$\bar{\bar{Y}} = \bar{\varphi}(\bar{u}) + \bar{e}.$$

Таким чином, задачею ідентифікації є знаходження залежності  $\bar{\varphi}(\bar{u})$  за умови дії перешкод, статистичні характеристики яких як правило невідомі.

Проблема знаходження залежності може бути розв'язана двома шляхами. Перший з них передбачає, що залежність  $\bar{\varphi}(\bar{u})$  можна вивести із теоретичних міркувань з точністю до декількох невідомих параметрів.

Основу другого шляху складає експериментальний підхід. В цьому випадку для побудови математичної моделі повинні бути використані відомості про об'єкт дослідження, на основі яких можна було би зробити висновок про адекватність моделі. Задача знаходження наближення (апроксимації) експериментальних даних до деякої функції носить назву задачі ідентифікації, а модель, яка отримана в процесі розв'язку цієї задачі, є емпіричною моделлю.

У роботах [23,144-146] запропонований метод побудови регресійних моделей на основі даних, які отримані за результатами спостережень за режимними параметрами у процесі експлуатації ГПА.

Регресійний аналіз включає питання застосування методу найменших квадратів для моделювання порівняно простих об'єктів (лінійні, квадратичні тощо). Основними завданнями регресійного аналізу є:

- вибір вихідних змінних (параметрів оптимізації);
- вибір вхідних змінних (чинників або аргументів);
- вибір структури моделі;
- дослідження алгоритмів використання моделі для знаходження екстремумів вихідних величин (симплекс-метод).

Всі вказані завдання вирішуються суб'єктивно із залученням великого об'єму апріорної інформації.

Для вирішення використовуються такі методи:

*Кореляційний аналіз.* Коефіцієнт парної кореляції змінних  $y_1$  і  $y_2$ :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^Y (y_{1i} - \bar{y}_1)(y_{2i} - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^Y (y_{1i} - \bar{y}_1)^2 \sum_{i=1}^Y (y_{2i} - \bar{y}_2)^2}},$$

де

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y y_{1i},$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y y_{2i}.$$

*Дисперсійний аналіз.* Внесок кожної змінної оцінюється за її середньоквадратичною оцінкою, розрахованою на всіх точках таблиці:

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^Y (y_i - \bar{y})^2}{Y - l - 1},$$

де  $Y - l - 1$  - кількість ступенів свободи;

$Y$  - кількість точок;

$l$  - кількість змінних.

Змінна, виключення якої викликає достатньо малу зміну дисперсії, вважається не істотною і виключається з розгляду.

*Факторний аналіз.* Внесок кожної змінної оцінюється за її впливом на середнє значення вихідної величини.

*Аналіз показників істотності змінних.* Значущість факторів визначається найчастіше за критерієм істотності Стьюдента  $t$ .

Недоліком регресійних моделей є те, що структура моделі вибирається довільною. Коефіцієнти моделі розраховуються за методом найменших квадратів (МНК). Такий критерій апроксимації результатів експерименту поліноміальною залежністю (регресійною моделлю) носить назву [147] внутрішнього критерію. Складність поліноміальної моделі оцінюється кількістю і максимальним ступенем доданків. Чим більша кількість членів моделі – тим вона точніша. Отримана у такий спосіб математична модель може досить точно описувати табличні дані експерименту, але дати досить хибне уявлення як про структуру моделі, так і про властивості об'єкта. Це пояснюється неточністю вихідних експериментальних даних, оскільки на вимірювані значення технологічних параметрів накладається перешкода, яка у значній мірі може спотворювати шукану залежність між виходом і входом об'єкта.

Метод найменших квадратів, заснований на «внутрішньому» критерії (середньоквадратична похибка на всіх точках), не придатний для знаходження моделі оптимальної складності через слабку завадостійкість внутрішніх критеріїв, до яких він відноситься. Задачу побудови єдиної моделі оптимальної складності вирішують методи самоорганізації моделей, засновані на завадостійких, «зовнішніх» критеріях.

Проте це не виключає ефективності методу найменших квадратів при рішенні задачі наближеної апроксимації функцій всередині області інтерполяції, де достатньо густо задані експериментальні точки. Власне кажучи, метод і був задуманий Гаусом для вирішення завдання інтерполяції.

Теорія множинності моделей стверджує, що за експериментальними даними принципово неможливо знайти єдину модель [147]. Наприклад, як поліном регресії можна взяти поліном будь-якого вигляду і будь-якого ступеня, і



для кожного з них регресійний аналіз вкаже значення коефіцієнтів. У будь-якому достатньо складному рівнянні підбираються оцінки коефіцієнтів так, щоб похибка на інтервалі спостереження (інтерполяції) була малою або навіть рівною нулю.

Вирішення питання про вибір єдиного рівняння регресії оптимальної складності дає принцип зовнішнього доповнення. Тільки зовнішнє доповнення може бути арбітром при порівнянні суперечливих теорій.

Поняття зовнішнього доповнення отримало свій розвиток в математичній логіці у зв'язку з появою теореми неповноти Геделя. Згідно цій теоремі ніяка система аксіом не може бути логічно замкнутою: завжди можна знайти таку теорему, для доказу якої буде потрібно зовнішнє доповнення - розширення початкової системи аксіом [147].

Критерій називається внутрішнім, якщо його визначення засноване на використанні тієї ж інформації, тих же даних, що і для отримання самої моделі.

Критерій називається зовнішнім, якщо його визначення засноване на новій інформації, «свіжих» точках, які не використовувались при синтезі моделі. Структура оптимальної складності відповідає мінімуму зовнішнього критерію.

Прикладами внутрішніх критеріїв можуть служити величини, які визначаються за методом найбільшої правдоподібності або методу найменших квадратів, у випадку, якщо відсутнє розділення точок на так звані навчальні і перевірочні послідовності, з метою отримання зовнішніх критеріїв.

При використанні внутрішніх критеріїв дослідник потрапляє в ситуацію, що *«чим складніша модель, тим вона точніша»*, що не відповідає істині. Тому для вибору моделі слід застосовувати тільки зовнішні критерії.

Зовнішній критерій завжди приводить до єдиної моделі оптимальної складності.

Сучасний системний аналіз, вся теорія ідентифікації об'єктів керування і регресійний аналіз побудовані на використанні внутрішніх критеріїв, тобто не враховують теореми Геделя або застосовують недоцільно випадково вибрані

зовнішні критерії. Максимум правдоподібності і середньоквадратична похибка, розрахована на всіх експериментальних точках, є внутрішніми критеріями. Згідно ідеям Геделя, синтез моделей повинен бути заснований на застосуванні зовнішніх критеріїв, на що в математичному моделюванні до цих пір не звертали уваги [148].

При поступовому ускладненні моделі зовнішній критерій проходить через мінімум, що дає можливість знайти єдину для даного критерію оптимальну модель. Глибина мінімуму служить мірою достовірності знайденої моделі [149].

Тому альтернативою регресійного підходу до побудови математичних моделей є індуктивний метод моделювання, який заснований на принципі самоорганізації і мінімального обсягу апріорної інформації про об'єкт.

Завдання моделювання полягає в отриманні математичного опису процесу або об'єкту. Вона може бути вирішена за допомогою двох підходів:

- *дедуктивного*, при якому людина - автор моделі - вказує фізичні закони елементів системи, а ЕОМ тільки досліджує їх взаємодію;

- *індуктивного*, при якому використовується деяка таблиця початкових експериментальних даних і за допомогою перебору великої кількості моделей, електронно-обчислювальною машиною знаходиться модель оптимальної складності, із застосуванням того або іншого зовнішнього критерію селекції, що іназивається самоорганізацією моделей на ЕОМ.

При самоорганізації моделей апріорна інформація, необхідна для моделювання, зводиться до мінімуму: задаються «середовище моделювання» (таблиця даних) і критерій. Все, що достовірно відомо про об'єкт (наприклад, структура системи), також задається ЕОМ - це зменшує об'єм перебору моделей.

Перебору варіантів підлягають тільки ті питання, теорія яких апріорі достовірно не відома. У цьому і полягає комбінований дедуктивно-індуктивний підхід в моделюванні.

Принципи самоорганізації моделей можна сформулювати так: при поступовому збільшенні складності моделей (наприклад, моделі лінійні,

квадратичні, третього ступеня) значення внутрішніх критеріїв (за наявності шуму) монотонно падає. У тих же умовах всі зовнішні критерії проходять через свої мінімуми (екстремуми), що і дає можливість визначити модель оптимальної складності, єдину для кожного зовнішнього критерію. Завжди можна запрограмувати ЕОМ так, щоб знайти такий порядок ускладнення структури моделі, при якому мінімум зовнішнього критерію виходить єдиним.

Перебираючи моделі від найпростішої до складнішої (або навпаки), машина знаходить модель оптимальної складності, єдину для кожного зовнішнього критерію. Для успішного вирішення задачі моделювання, важливо вибрати зовнішній критерій, який відповідає типу задачі моделювання.

В алгоритмах самоорганізації моделей на ЕОМ таблиця початкових даних ділиться принаймні на дві частини: навчальну  $A$  і перевірочну  $B$  послідовності. При цьому середньоквадратична похибка  $\Delta(B)$ , яка визначається на перевірочній послідовності, є одним з критеріїв для вибору структури моделі, що синтезується за даними навчальної послідовності. Так створюється перше зовнішнє доповнення.

Якщо ставиться завдання оптимізації розділення даних на навчальну і перевірочну частини, то, згідно теореми Геделя, потрібне ще одне, друге, зовнішнє доповнення. Таблицю даних доводиться ділити на три частини: навчальну -  $A$ , перевірочну -  $B$ , і дві екзаменаційні послідовності -  $C$  і  $D$ .

Як доцільні зовнішні доповнення в теорії самоорганізації моделей використовуються такі критерії [149].

**Критерій регулярності** – середньоквадратична похибка, розрахована на нових точках, які не використовувались для отримання оцінок коефіцієнтів моделі:

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i \in Y_B} (y_i^{(B)} - y_i)^2}{\sum_{i \in Y_B} y_i^2}, \quad (4.4)$$

де  $y_i^{(B)}$  - експериментальні значення вихідної величина на множині  $B$ .

$y_i$  - вихідна величина об'єкта моделі оптимальної складності;

$Y_B$  - кількість елементів (експериментальних точок) множини  $B$ .

Перевірочна послідовність використовується в методах групового врахування аргументів (МГВА) для вибору кількості членів і ступеня рівняння регресії; це дозволяє отримати найбільш регулярне рішення (оптимальної складності), малочутливе до невеликих змін початкових даних. Таке рішення дає невелику похибку на нових точках, в чому і полягає основна мета МГВА в завданнях ідентифікації. Величина критеріїв регулярності обчислюється за даними окремої перевіркової послідовності.

Критерій регулярності заснований на розділенні наявних експериментальних даних на дві частини: навчальну  $Y_A$  і перевірочну  $Y_B$  послідовності. Згідно третього способу регуляризації [148], всі експериментальні точки розташовуються в ряд за величиною їх дисперсії від середнього значення, і цей ряд ділиться на дві послідовності.

Якщо початкові дані знімаються в строгій тимчасовій послідовності (наприклад експериментальні дані фізичного поля або технологічного процесу), то ранжировка точок в ряд недопустима. В цьому випадку можна застосувати поділ точок за парними та непарними індексами. Після розділення за тим або іншим способом перші  $Y_A$  точок складають навчальну послідовність, наступні  $Y_B$  точок - перевірочну.

Фізичний сенс критерію регулярності полягає в тому, що він орієнтований на вибір моделі, яка буде найбільш точною на множині точок, яких ще немає в таблиці, але вони з'являться там в майбутньому. Тому критерій регулярності рекомендується для короткострокових прогнозів.

Моделі, знайдені за мінімумом критерію регулярності, добре вирішують задачу короткострокового прогнозу при малому рівні шумів в початкових даних. При збільшенні перешкод мінімум критерію регулярності зміщується вліво, у бік вибору простіших моделей, і при великій інтенсивності шумів оптимальними виявляються лінійні прогнозуючі моделі.

За наявності перешкод результат синтезу за критерієм регулярності не співпадає з фізичною моделлю об'єкту. Оптимальна прогнозуюча модель іноді є «безглуздою» з погляду людської логіки. На відміну від цього, моделі за критерієм мінімуму зміщення зазвичай відповідають теорії процесу.

**Критерій мінімуму зміщення** вимагає максимального співпадання значень вихідної величини двох моделей, отриманих на двох різних частинах таблиці початкових даних:

$$n_{zm}^2 = \frac{\sum_{i \in Y} (y_i^A - y_i^B)^2}{\sum_{i \in Y} y_i^2}, \quad (4.5)$$

де  $y_i^{(A)}$  - експериментальні значення вихідної величини на множині  $A$ ;

$y_i^{(B)}$  - експериментальні значення вихідної величини на множині  $B$ ;

$y_i$  - вихідна величина об'єкта моделі оптимальної складності;

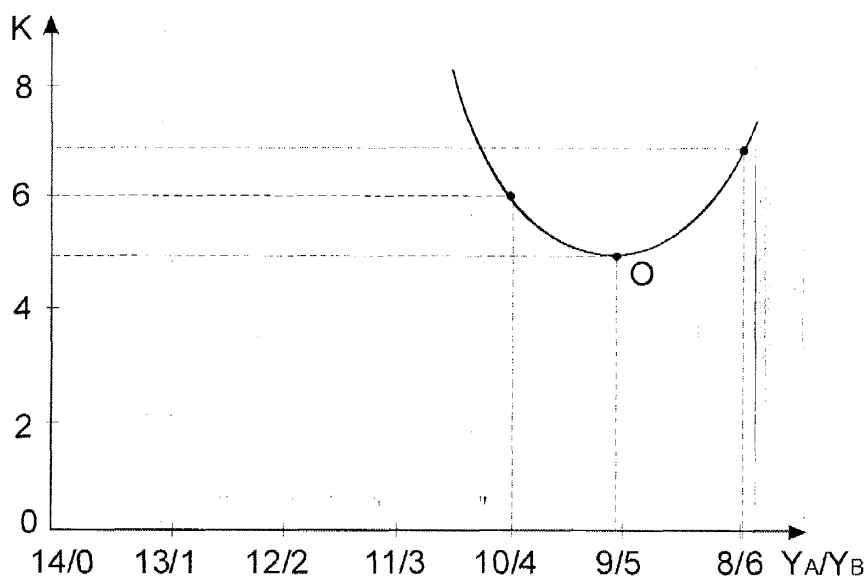
$Y$  - кількість експериментальних точок.

Загальна, основна ідея побудови критерію мінімуму зміщення полягає в тому, що моделі, які отримують при використанні різних частин таблиці початкових даних, повинні, по можливості, мало відрізнятися одна від одної, а при повній відсутності зміщення – співпадати. Це означає, що якщо початкові дані розбиті на дві частини,  $A$  і  $B$ , то модель, отримана на множині точок  $A$ , повинна якомога менше відрізнятися від моделі, отриманої на множині точок  $B$ .

Стійкішими до перешкод є різні форми критерію мінімуму зміщення, скільки, хоча при збільшенні перешкод мінімальне значення показника зміщення теж збільшується, мінімум виходить при одній і тій же складності моделі, що відповідає дійсній моделі (це пояснює, чому такий критерій рекомендується для вирішення завдання відкриття законів). При малих шумах в початкових даних критерій регулярності і критерій незміщеності рівноцінні і приводять, зазвичай, до однакових результатів.

Як доповнення можуть використовуватися критерій мінімальної кількості відсівів селекції, мінімаксий критерій та інші (наприклад, діаметр «хмари» точок).

**Критерій мінімальної кількості рядів селекції.** Відповідно до цього критерію потрібно вибрати таке розділення таблиці спостережень, при якому алгоритми багаторядності МГВА потребуватимуть мінімальної кількості рядів селекції. Отримана при цьому модель буде найпростішою. У кожному конкретному випадку може бути отримана оптимальна кількість рядів за допомогою зміни відношення кількості точок в навчальній вибірці  $Y_A$  до точок в перевіірочній вибірці  $Y_B$ . Визначення оптимального розділення таблиці даних на навчальну і перевіірочну послідовності («парабола Тодуа») зображено на рис. 4.2.



**Рис. 4.2 – Визначення оптимального розділення даних на навчальну та перевіірочну множини ("парабола Тодуа")**  
 **$K$  – кількість рядів селекції;  $O$  – найпростіша модель.**

Точки ранжируються за дисперсією вихідної величини в один ряд, а потім будується парабола. Мінімум кількості рядів селекції вказує на оптимальне розділення, тобто, чим менше рядів, тим простіша і достовірніша модель.

Повний перебір варіантів розділення таблиці даних на дві однакові послідовності  $Y_A$  і  $Y_B$ . Для розрахунку критерію мінімуму зміщення необхідне розділення на дві однакові, за кількістю точок, вибірки (склад кожної з них може бути різним). Для того, щоб отримати оптимальне розділення, слід провести повний перебір всіх можливих варіантів приналежності точок до навчальної і перевіірочної вибірки. Такий перебір практично можна реалізувати для дуже коротких виборок даних.

При синтезі трендів оптимальної складності організовується перебір великої кількості трендів-претендентів за критеріями регулярності, мінімуму зміщення, критерію збіжності, балансу змінних або комбінованим критерієм.

У програмах часто вибираються наступні розділення експериментальних даних [148].

Для критерію регулярності:

$$Y_A = 0,7Y; Y_B = 0,3Y; Y_C = 0; Y_D = 0,$$

або

$$Y_A = 0,6Y; Y_B = 0,2Y; Y_C = 0,1Y; Y_D = 0,1Y.$$

Для критерію мінімуму зміщення:

$$Y_A = 0,5Y; Y_B = 0,5Y; Y_C = 0; Y_D = 0,$$

або

$$Y_A = 0,4Y; Y_B = 0,4Y; Y_C = 0,1Y; Y_D = 0,1Y.$$

Алгоритми МГВА, використовуються для системного аналізу взаємодій в системі, дозволяють знайти систему рівнянь оптимальної складності. Алгоритми для ідентифікації дають єдину модель оптимальної складності. Об'єктивність досягається тим, що діалог людини (автора моделі) і машини ведеться не на мові металевих вказівок, як при імітаційних методах моделювання, а на мові постановки критеріїв вельми загального вигляду: критерію регулярності, точності короткострокового прогнозу, мінімуму зміщення, точності покрокового прогнозу, стійкості імовірнісних характеристик, балансу прогнозів і багатьох інших критеріїв.

На основі сказаного вище, можна зробити висновок, що критерій мінімуму зміщення дозволяє вибрати модель, найменш чутливу до зміни множини експериментальних точок, за яких вона отримана. Цей критерій дозволяє вирішувати задачу відновлення закону, прихованого в зашумлених експериментальних даних, а тому рекомендується для вирішення завдання ідентифікації.

## 4.2. Метод та алгоритми побудови математичних моделей нагнітачів природного газу

При реалізації індуктивного методу моделювання допускається, що функціональна залежність (4.1) задана у вигляді поліноміальної залежності

$$y = \sum_{i=1}^Y a_i \prod_{k=1}^r u_k^{\alpha_{ki}}, \quad \sum_{k=1}^r \alpha_{ki} \leq j, \quad (4.6)$$

де  $y$  - вихідна величина;

$u_k$  -  $k$ -та екзогенна змінна;

$a_i$  - коефіцієнти моделі, визначені на множині  $A$ ;

$\alpha_{ki}$  - степені аргументів, які приймають значення  $0, 1, \dots, j$ ;

$r$  - кількість аргументів моделі (вхідних змінних об'єкта).

Кількість  $F$  членів полінома (4.6) визначається за такою формулою:

$$F = \frac{1}{r!} \prod_{k=1}^r (j+k).$$

Початкова вибірка експериментальних даних розбивається на три множини: множина  $A$  - навчальна; множина  $B$  - перевірна і множина  $C$  - екзаменаційна. Множина  $A$  служить для визначення коефіцієнтів моделей. Вибір моделі оптимальної складності із множини можливих є багатозначною і некоректною задачею. Для того, щоб отримати однозначну модель, додатково формулюють зовнішні критерії як на множині  $B$ , так і на множині  $C$ . До таких критеріїв відносять [149]: критерій регулярності  $\Delta^2(B)$  та критерій зміщення (не протиріччя) моделі  $n_{zm}^2$ . Критерій регулярності визначає середньоквадратичне відхилення на множині  $B$  (4.4). Критерій зміщення визначають як середньоквадратичне значення відхилень виходів моделей  $y_i^A$  і  $y_i^B$  визначених на множинах  $A$  і  $B$  для всієї вибірки  $Y$  (4.5).

В алгоритмах МГВА розділення даних спостережень будемо проводити



наступним чином:

критерій регулярності -  $Y_A = 0,7Y$ ;  $Y_B = 0,2Y$ ;  $Y_C = 0,1Y$ ;

критерій зміщення -  $Y_A = 0,5Y$ ;  $Y_B = 0,4Y$ ;  $Y_C = 0,1Y$ .

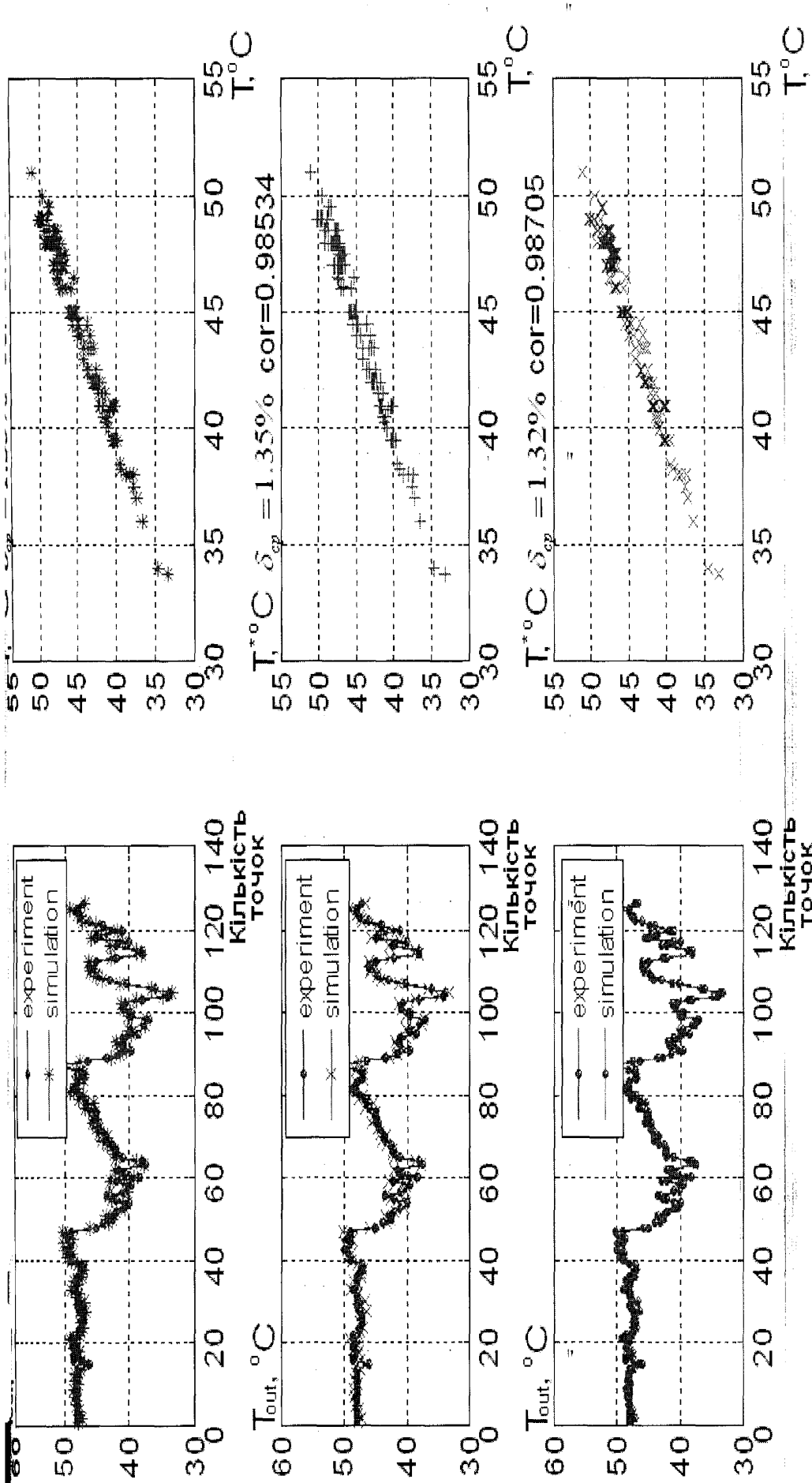
Визначення моделі за алгоритмом оптимальної складності відбувається у два етапи [150]. На першому етапі із повного набору моделей різної складності за критерієм регулярності або зміщення вибирається  $K$  кращих структур. На другому етапі для  $K$  структур, відібраних на першому етапі, перераховуються коефіцієнти на всій вибірці експериментальних даних. При цьому визначається середньоквадратична похибка апроксимації  $\Delta(A+B)$  і екстраполяції  $\Delta(C)$ . Кінцевий вибір моделі здійснюється шляхом порівняльного аналізу структур отриманих  $K$  моделей, середньоквадратичних похибок  $\Delta(A+B)$  та  $\Delta(C)$ .

Для реалізації розробленого алгоритму побудови моделі оптимальної складності розглянемо процес визначення залежності температури природного газу на виході із відцентрового нагнітача  $T_{out}$  від таких технологічних параметрів, як частота обертання вала нагнітача  $n_n$ , температура газу на вході в нагнітач  $T_{in}$ , ступінь підвищення тиску газу  $\varepsilon$ , тиск газу на вході в нагнітач  $P_{in}$ , температура  $T_c$  та тиск  $P_c$  навколишнього середовища (формула 4.2). Прийmemo позначення:  $y = T_{out}$ ;  $u_1 = T_{in}$ ;  $u_2 = n_n$ ;  $u_3 = \varepsilon$ ;  $u_4 = P_{in}$ ;  $u_5 = T_c$ ,  $u_6 = P_c$  та виберемо модель (4.6), у якій  $n \leq 2$ . У результаті отримаємо:

$$y = a_0 + a_1 u_1 + a_2 u_2 + a_3 u_3 + a_4 u_4 + a_5 u_5 + a_6 u_6 + a_7 u_1^2 + a_8 u_1 u_2 + a_9 u_2^2 + a_{10} u_1 u_3 + a_{11} u_2 u_3 + a_{12} u_3^2 + a_{13} u_1 u_4 + a_{14} u_2 u_4 + a_{15} u_3 u_4 + a_{16} u_4^2 + a_{17} u_1 u_5 + a_{18} u_2 u_5 + a_{19} u_3 u_5 + a_{20} u_4 u_5 + a_{21} u_5^2 + a_{22} u_1 u_6 + a_{23} u_2 u_6 + a_{24} u_3 u_6 + a_{25} u_4 u_6 + a_{26} u_5 u_6 + a_{27} u_6^2.$$

Для побудови моделі оптимальної складності був вибраний критерій зміщення, а кількість моделей, що підлягали відбору – три.

У середовищі MatLab створена програма, за допомогою якої отримана математична модель газоперекачувального агрегату оптимальної складності. Результат роботи програми відтворює рис. 4.3 та табл. 4.1.



$T^*$  - експериментальні значення температури;

$T$  - обчислені значення температури;  $cor$  - коефіцієнт кореляції.

Рис. 4.3. Апроксимація температури на виході із нагнітача ГПА за критерієм зміщення трьох моделей

Таблиця 4.1

## Значення коефіцієнтів полінома

Коефіцієнти моделей	Моделі ГПА оптимальної складності		
	Перша модель	Друга модель	Третя модель
$a_0$	0,18858	0,014363	0,12912
$a_1$	0	0	0,41012
$a_2$	0,48149	0	0,39911
$a_3$	0	1,1149	0
$a_4$	0	0	0
$a_5$	-0,23158	0	-0,2827
$a_6$	0	0	0
$a_7$	0	-0,20232	0
$a_8$	0,26502	0,47814	-0,1958
$a_9$	-1,6461	0	-1,4218
$a_{10}$	0	0	0
$a_{11}$	2,662	0	2,5623
$a_{12}$	-0,88603	-0,37977	-0,86373
$a_{13}$	0	0	0
$a_{14}$	0	-0,15109	0
$a_{15}$	0	0	0
$a_{16}$	0,13332	0	0
$a_{17}$	0	0,12138	0
$a_{18}$	0,30411	0	0,47315
$a_{19}$	0	0	0
$a_{20}$	0	0	0
$a_{21}$	-0,21178	0	-0,21679
$a_{22}$	0	0,11244	0
$a_{23}$	0,79051	0	0,78828
$a_{24}$	0	0	0
$a_{25}$	0,32263	0	0,33132
$a_{26}$	0	0	0
$a_{27}$	0	0	-0,21679

Було отримано три моделі [151]:

$$y = a_0 + a_2 u_2 + a_5 u_5 + a_8 u_1 u_2 + a_9 u_2^2 + a_{11} u_2 u_3 + a_{12} u_3^2 + a_{16} u_1 u_5 + a_{18} u_2 u_5 + a_{21} u_5^2 + a_{23} u_2 u_6 + a_{25} u_4 u_6, \quad (4.7)$$

$$y = a_0 + a_3 u_3 + a_7 u_1^2 + a_8 u_1 u_2 + a_{12} u_3^2 + a_{14} u_2 u_4 + a_{17} u_1 u_5 + a_{22} u_1 u_6, \quad (4.8)$$

$$y = a_0 + a_1 u_1 + a_2 u_2 + a_3 u_3 + a_4 u_4 + a_5 u_5 + a_6 u_6 + a_7 u_7 + a_8 u_1 u_2 + a_9 u_2^2 + a_{10} u_2 u_3 + a_{11} u_2 u_3 + a_{12} u_3^2 + a_{13} u_2 u_5 + a_{14} u_5^2 + a_{15} u_2 u_6 + a_{16} u_4 u_6 + a_{17} u_6^2, \quad (4.9)$$

які практично з однаковою точністю апроксимують вихідні дані. Аналіз моделей (4.7) – (4.9) показує, що поліноміальна модель (4.8) має найменшу кількість параметрів. Крім того всі вони включають шість вхідних змінних, а це є одним із вирішальних факторів, оскільки він визначає придатність моделі для розв'язку задачі оптимального розподілу навантаження між агрегатами.

Обчислення коефіцієнтів часткових моделей здійснювалось за методом найменших квадратів. Для коректного розв'язку такої задачі необхідно [152], щоб матриця Фішера була добре обумовлена. Як показали чисельні розрахунки цього можна досягти, якщо як вхідні, так і вихідні величини об'єкта привести до безрозмірного вигляду

$$W_i = \frac{w_i - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}},$$

де  $w_i$  - значення величини,  $i = \overline{1, Y}$ ;

$W_i$  - значення величини, приведене до безрозмірного вигляду,  $i = \overline{1, Y}$ ;

$w_{\min} = \min_{1 \leq i \leq Y} w_i$  - мінімальне значення величини;

$w_{\max} = \max_{1 \leq i \leq Y} w_i$  - максимальне значення величини.

Аналогічні алгоритми побудови моделей оптимальної складності виконані для визначення залежності витрати паливного газу, температури вихлопних газів на виході ТНТ та продуктивності нагнітачів. Результати побудови моделей приведені в додатку Л. Тексти програм в середовищі MatLab подані в додатку М.

Оцінювати точність моделі можна за величиною [24]:

$$\delta_{cp}, \% = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y |\delta_i, \%|,$$

де  $\delta_i, \% = \frac{y_i^* - y_i}{y_i^*} \cdot 100\%$ ,  $i = \overline{1, Y}$ ;

$y_i^*$  - експериментальні значення вихідної величини;

$y_i$  - обчислені значення вихідної величини.

Величина  $\delta_i, \%$  взята за модулем, щоб виключити взаємне компенсування додатних і від'ємних значень величин  $\delta_i$ .

Інший спосіб оцінки точності моделі, це обчислення кореляційного зв'язку між величинами  $y_i^*$  і  $y_i$ . При точному співпадінні значень  $y_i^*$  і  $y_i$  будемо мати пряму лінію на площині  $y^*y$ .

У випадку, коли дані спостережень апроксимовані з певною похибкою будемо мати відхилення точок на площині  $(y^*, y)$  від прямої лінії. У випадку точного співпадіння значень  $y^*$  і  $y$  коефіцієнт кореляції  $k_{y^*y}$  дорівнює одиниці. При відхиленні таких значень від прямої лінії значення коефіцієнта кореляції  $k_{y^*y}$  буде менше одиниці. Чим більше розсіювання, тим менша точність апроксимації і відповідно менший коефіцієнт кореляції.

Коефіцієнт кореляції між величинами  $y^*$  і  $y$  обчислювався за такою формулою [109]:

$$k_{y^*y} = \frac{\sum_{i=1}^{Y_a} (y_i^* - \bar{y}^*) \cdot (y_i - \bar{y}_i)}{\left( \sum_{i=1}^{Y_a} (y_i^* - \bar{y}^*)^2 \sum_{i=1}^{Y_a} (y_i - \bar{y}_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}},$$

де  $\bar{y}^* = \frac{1}{Y_a} \sum_{i=1}^{Y_a} y_i^*$  - середнє значення величини  $y^*$ ;

$\bar{y}_i = \frac{1}{Y_a} \sum_{i=1}^{Y_a} y_i$  - середнє значення величини  $y$ .

Як впливає із формули при  $y_i = y_i^*$ ,  $i = \overline{1, Y_a}$ ,  $k_{y^*y} = 1$ .

Кореляційний зв'язок між експериментальними та розрахованими значеннями зображений на рис. 4.3. Для моделей температури на виході магнітача коефіцієнт кореляції високий і змінюється в межах  $k_{y^*y} = \{0.985; 0.987\}$ , а значення середньої відносної похибки становить від 1.32% до 1.35%, що свідчить про адекватність побудованої моделі. Значення коефіцієнтів та кореляційний зв'язок для інших моделей приведені в додатку Н.

Також було проведено побудову регресійних моделей (4.6) на основі методів, запропонованих у роботах [23,144-146].

Для побудови математичної моделі, яка із максимальною точністю відтворює результати спостережень, використовувались три методи: МНК-метод, МНК-метод з сингулярним розкладом матриці  $F$  і метод ортогоналізації.

При виборі математичної моделі приймалися до уваги такі критерії:

- мінімальне значення середньої похибки апроксимації;
- максимальне значення коефіцієнта кореляції  $k_{yy}$ ;
- мінімальна кількість коефіцієнтів

Якщо три методи забезпечують близькі результати за точністю, то перевагу мала математична модель з мінімальною кількістю коефіцієнтів.

Реалізацію запропонованих методів розглянемо на прикладі побудови моделей залежності температури природного газу на виході із відцентрового нагнітача  $T_{out}$  від таких технологічних параметрів, як частота обертання вала нагнітача  $n$ , температури газу на вході в нагнітач  $T_m$ , ступеня підвищення тиску  $\epsilon$ , тиску газу на вході в нагнітач  $P_m$ , температури  $T_c$  та тиску  $P_c$  навколишнього середовища.

Приклад графіків залежності температури природного газу показані на рис. 4.4-4.6, а програми розрахунку приведені в додатку Р.

Із графіків видно, що МНК-метод та МНК-метод з сингулярним розкладом матриці  $F$ , забезпечують, практично, однакову точність. Максимальна похибка апроксимації становить 6.63%. Апроксимація з використанням методу ортогоналізації виконана точніше, і максимальна похибка становить 4.65%.

На рис. 4.7 подано порівняння результатів моделювання залежності температури газу на виході нагнітача за методом ортогоналізації, який вибрано на основі даних із таблиці 4.2, оскільки він забезпечує найменшу похибку та найбільший коефіцієнт кореляції, хоча має найбільшу кількість коефіцієнтів, та індуктивного методу моделювання за критерієм зміщення.

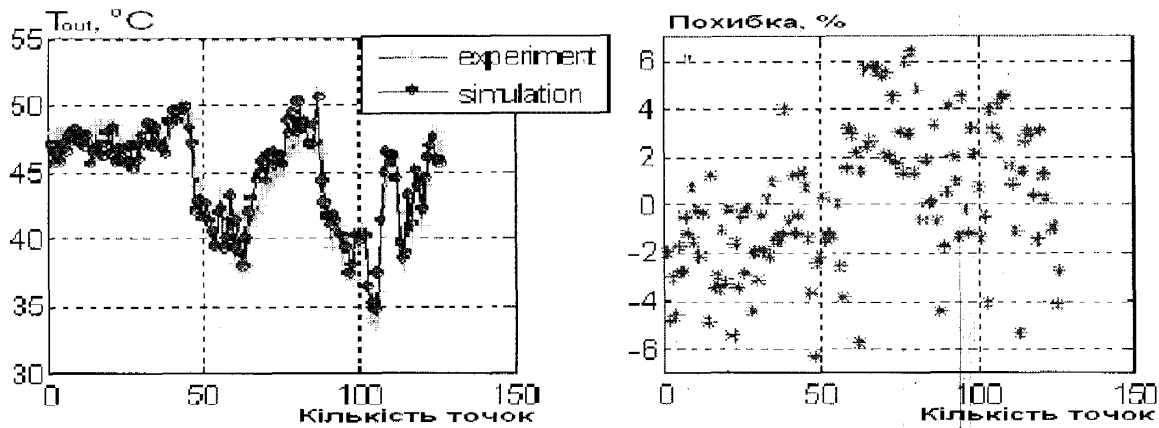


Рис. 4.4. Апроксимація температури на виході із нагнітача за МНК-методом

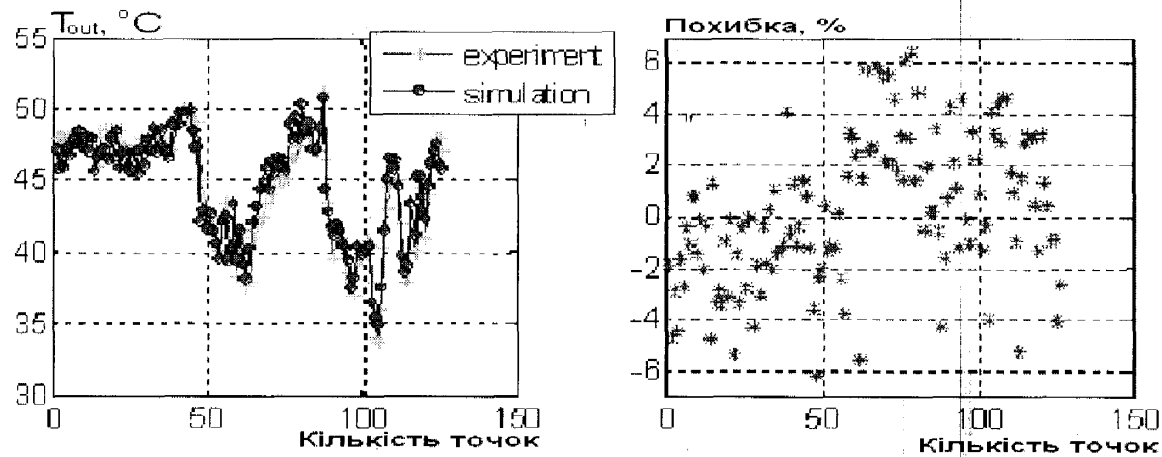


Рис. 4.5. Апроксимація температури на виході із нагнітача за МНК-методом з сингулярним розкладом матриці F

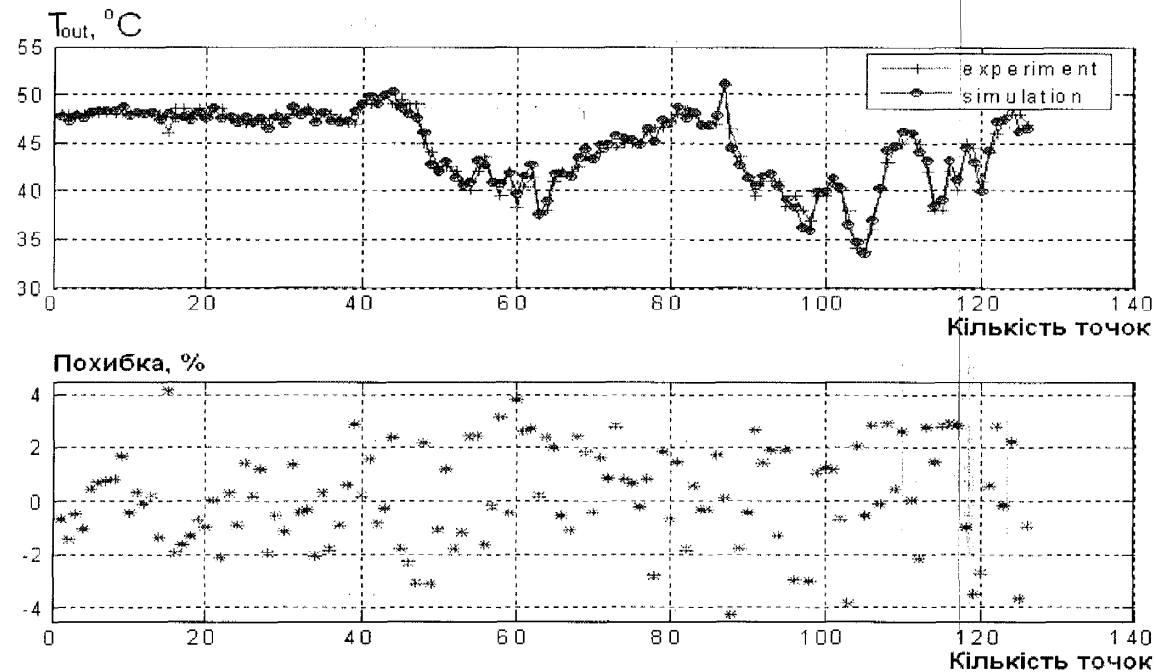


Рис. 4.6. Апроксимація температури на виході із нагнітача за методом ортогоналізації.

Таблиця 4.2

## Результати ідентифікації математичних моделей

Назва математичної моделі	МНК-метод			МНК-метод з сингулярним розкладом	$\alpha$	Метод ортогоналізації	
	$\alpha$	Кількість коефіцієнтів	$\frac{\delta, \%}{k_{yy}}$			Кількість коефіцієнтів	$\frac{\delta, \%}{k_{yy}}$
Залежність витрати паливного газу	2	21	$\frac{7.31}{0.76}$	$\frac{7.31}{0.76}$	2	52	$\frac{5.61}{0.97}$
Залежність температури газу на виході із нагнітача	2	21	$\frac{6.63}{0.905}$	$\frac{6.6}{0.905}$	2	29	$\frac{4.65}{0.917}$
Залежність температури газів за ПНТ	2	70	$\frac{13.06}{0.95}$	$\frac{13.06}{0.97}$	2	35	$\frac{7.05}{0.911}$
Продуктивність нагнітача	2	21	$\frac{15.5}{0.71}$	$\frac{15.5}{0.71}$	2	28	$\frac{3.27}{0.95}$

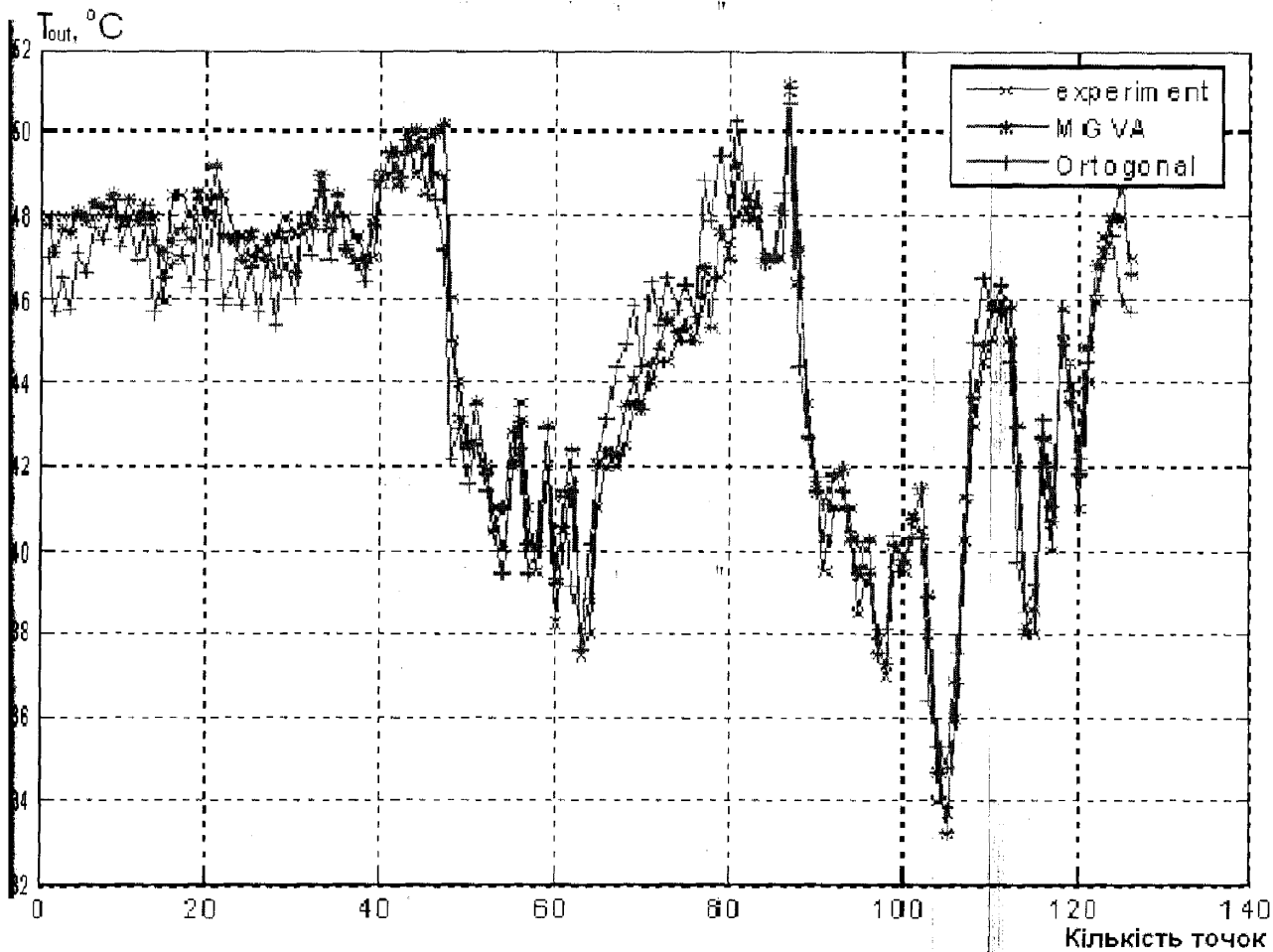


Рис. 4.7. Порівняння результатів апроксимації температури на виході із нагнітача за різними методами



Все програмне забезпечення задачі ідентифікації створено в середовищі системи MatLab. Програми, які реалізують алгоритми обчислень коефіцієнтів математичних моделей для інших параметрів, ідентичні програмам, які наведені в додатках М і Р. Вони відрізняються тільки операторами вводу/виводу.

На основі проведених розрахунків, було підтверджено, що самоорганізація (оцінка за критеріями) дає можливість вилучити співвідношення і зв'язки, які є зайвими чи випадковими. Після виключення явно непридатних моделей інші оцінюються за критерієм, і, як результат, вибирається модель оптимальної складності, яка з більшою точністю відтворює вихідні дані, в порівнянні із МНК методами.

#### **4.3. Формалізація задачі оптимального керування процесом компримування природного газу**

Важлива задача, яка стоїть перед газотранспортною галуззю країни, полягає в оптимізації режимів компресорних цехів. Згідно з різними джерелами, за рахунок вибору оптимального складу обладнання та оптимізації його режимів можна отримати економію енерговитрат за нормальних умов роботи в обсягах 3-5% загальних енерговитрат на компримування газу. Для української газотранспортної системи це може становити близько 220 млн. м<sup>3</sup> щорічно.

Отже, в галузі магістрального транспорту газу існує досить складна задача оптимального розподілу газових потоків і вибору найбільш економічного режиму роботи агрегатів з урахуванням різних технологічних обмежень. Один із способів вирішення цієї задачі запропоновано далі.

Для прикладу розглянемо КС-3 Долинського ЛВУМГ, на якій встановлено шість нагнітачів типу 16ГЦ2-395/53-76 з приводом суднового типу ДГ-90Л2. Регулювання частоти здійснюється шляхом зміни подачі паливного газу в камеру згорання ГТУ. Станція має надлишкову потужність. Тому працюють не всі агрегати, а тільки їх частина. В зв'язку з цим потрібно визначити кількість

агрегатів, яка повинна забезпечувати задану продуктивність станції. Також для заданої продуктивності компресорної станції, необхідно вибрати оптимальні робочі режими для кожного агрегату за умови, що будуть забезпечені мінімальні затрати на їх експлуатацію.

Спочатку визначаємо необхідну кількість агрегатів, щоб забезпечити задану продуктивність компресорної станції.

Після цього необхідно знайти режим роботи кожного із компресорів, забезпечивши необхідну продуктивність станції, обмеження на технологічні параметри та загальні мінімальні затрати на експлуатацію агрегатів.

Загальні затрати на експлуатацію компресорної станції з нагнітачами, приводом яких є газотурбінні установки, будуть виражатись таким співвідношенням [23]:

$$\min : J = C_p \sum_{i=1}^m G_i, \quad (4.10)$$

де,  $J$  - вартість роботи групи із  $m$  агрегатів, віднесеної до одиниці часу;

$C_p$  - вартість одиниці об'єму газу, що йде на споживання;

$G_i$  - витрата газу віднесена до нормальних умов, яку споживає  $i$ -ий агрегат;

Очевидно, що кількість компресорів  $m$  в групі не повинна перевершувати їх максимального значення  $b$ , тобто

$$m \leq b. \quad (4.11)$$

Кількість компресорів повинна бути такою, щоб забезпечити необхідну продуктивність компресорної станції. Остання вимога приводить до рівняння:

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i^{(n)}, \quad (4.12)$$

де,  $Q$  - загальна (планова) продуктивність групи нагнітачів;

$Q_i^{(n)}$  - паспортна продуктивність  $i$  - того нагнітача.

До умов (4.11), (4.12) приєднаємо очевидну вимогу невід'ємності значення величини  $m$ :  $m \geq 0$ .

#### 4.3.1. Оптимізація технологічного режиму компресорної станції.

Змістом розв'язку задачі оптимального керування процесом компримування природного газу є підтримання продуктивності КС на заданому рівні при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами. Тут під оптимальним розподілом слід розуміти таке завантаження агрегатів, яке забезпечує мінімум енерговитрат на компримування газу при виконанні ряду обмежень зі сторони всмоктування і нагнітання, та врахуванні технічного стану нагнітачів.

Для КС-3 витрати на компримування газу складаються із вартості газу, який йде на спалювання в ГТУ (4.10).

Компресорна станція, як об'єкт керування, є складним комплексом агрегатів, режим роботи яких необхідно змінювати при коливанні відбору газу вздовж траси магістрального трубопроводу [15]. З цією метою в технологічних схемах КС передбачений такий параметр керування, як зміна частоти обертання ротора нагнітача.

Тому задачею оптимізації є вибір частоти обертання ротора нагнітача, виходячи із мінімізації критерію оптимальності (4.10). Такий вибір повинен здійснюватись з врахуванням ряду обмежень на процес компримування газу.

У відповідності з технологічним режимом необхідно обмежити температуру газу на виході із нагнітача -  $T_{out}$ , температуру продуктів згорання на виході ТНТ -  $T_v$ . Для безпомпажної роботи нагнітачів повинна бути обмежена нижня частота обертання ротора нагнітача [23,153-155]. Тобто:

$$T_{out} \leq T_{out}^{(max)}, \quad (4.13)$$

$$T_v \leq T_v^{(max)}, \quad (4.14)$$

$$n_i^{(min)} \leq n_i \leq n_i^{(max)}, \quad (4.15)$$

іє  $T_{out}^{(max)}$ ,  $T_v^{(max)}$  - максимально допустимі значення величин  $T_{out}$  та  $T_v$ ;

$n_i$  - частота обертання ротора  $i$  - того нагнітача природного газу;

$n_i^{(min)}$ ,  $n_i^{(max)}$  - нижнє і верхнє обмеження на частоту ротора нагнітача.

При виконанні обмежень (4.13) - (4.15) повинна виконуватись вимога забезпечення заданої продуктивності КС (4.11).

Тиск на вході нагнітача задається режимом роботи попередньої компресорної станції і він є відомим, а тиск на виході нагнітача повинен мати певне значення, тоді ступінь підвищення тиску газу у нагнітачі  $\varepsilon$  є визначеною величиною.

Таким чином, метою оптимальне керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану є підтримання продуктивності КС на заданому рівні при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами на основі фактичного технічного стану ГПА.

#### **4.4. Розробка методу та алгоритмів оптимальне керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану**

В розділі 4.3 була сформована задача оптимізації, у відповідності з якою необхідно вибрати такий режим роботи ГПА, щоб загальні витрати на компримування газу були б мінімальними [156,157].

Виходячи із мінімальних витрат на компримування газу, визначаємо кількість працюючих компресорів із врахуванням коефіцієнтів їх технічного стану. Потім визначаємо технологічні режими для кожного газоперекачувального агрегату.

Для багатоцехової компресорної станції задачі (4.11) - (4.12) є задачами лінійного програмування (ЛП), в яких керуючі дії  $m$  є цілочисловими змінними. Методи розв'язку задач цілочислового лінійного програмування (ЦЛП) детально розглянуто в роботі [23].

В табл. 4.3 наведені вихідні дані, а в табл. 4.4 - розв'язок задачі знаходження необхідної кількості агрегатів.

Таблиця 4.3

Вихідні дані для знаходження необхідної кількості працюючих агрегатів

	ГПАН№1	ГПАН№2	ГПАН№3	ГПАН№4	ГПАН№5
Тип нагнітача	16ГЦ2-395/53-76				
Загальна кількість нагнітачів	5				
З них :					
в резерві	0				
в ремонті	0				
Ресурс оптимізації	5				
Коефіцієнт технічного стану	0,927	0,947	0,943	0,939	0,923
Продуктивність, ст.м <sup>3</sup> /хв	22500	22500	22500	22500	22500

Таблиця 4.4

Результати розв'язку задачі знаходження необхідної кількості нагнітачів

	ГПАН№1	ГПАН№2	ГПАН№3	ГПАН№4	ГПАН№5
Типи нагнітача	16ГЦ2-395/53-76				
Задана продуктивність КС-3, н.м <sup>3</sup> /хв	65000				
Ресурс оптимізації	5				
Оптимальна кількість агрегатів	3				
Продуктивність при оптимальному виборі кількості агрегатів, ст.м <sup>3</sup> /хв:					
загальний	67500				
по нагнітачах	-	22500	22500	22500	-

Оскільки залежність температури вихлопних газів  $T_{out}^{(i)} = f_2^{(i)}(n_i, T_m, \varepsilon, P_m, T_c, P_c)$  і температури газу на виході із ВЦН  $T_v^{(i)} = f_4^{(i)}(n_i, \varepsilon, P_m, T_c, P_c)$  є функціями технологічних параметрів  $P_m, T_m, \varepsilon$  та параметрів навколишнього середовища  $P_c$  і  $T_c$ , які задані, то підставивши останні в отримані рівняння регресії, що мають вигляд полінома (4.6), отримаємо залежності  $T_{out}^{(i)} = \psi_2^{(i)}(n_i)$  і  $T_v^{(i)} = \psi_4^{(i)}(n_i)$ . Ці залежності будуть функціями лише однієї змінної  $n_i$ . Обмеження (4.13) і (4.14) задають верхню межу значень температур  $T_{out}^{(max)}$  і  $T_v^{(max)}$ , що приводить до рівнянь  $\psi_2^{(i)}(n_i) - T_{out}^{(max)} = 0$  і  $\psi_4^{(i)}(n_i) - T_v^{(max)} = 0$ . У результаті отримаємо квадратні рівняння, додатними коренями яких будуть величини  $n_i^{(out)}$  і  $n_i^{(v)}$ . Тоді  $n_{i,max} = \min(n_i^{(out)}, n_i^{(v)}, n_{i,max})$ .

З урахуванням значення  $\tilde{n}_{i,\max}$  задача оптимізації технологічного режиму паралельно працюючих агрегатів має такий вигляд:

$$J(\bar{n}) = C_f \sum_{i=1}^m G_i(n_i), \quad (4.16)$$

$$n_{i,\min} \leq n_i \leq \tilde{n}_{i,\max}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (4.17)$$

$$q = \sum_{i=1}^m k_i \cdot Q_i(n_i). \quad (4.18)$$

де  $k_i$  - коефіцієнт завантаження  $i$ -го нагнітача, і  $0 \leq k_i \leq 1$ ;

$q$  - середня продуктивність нагнітача у групі.

По відношенню до керуючих дій  $n_i$  задача оптимізації (4.16)-(4.18) є задачею нелінійного програмування.

Задачі нелінійного програмування (НП-задачі) є досить складними і цю складність відображає арсенал методів, які застосовуються для розв'язку таких задач [23].

Основними методами, які застосовують для розв'язку НП-задач є методи [23] штрафних і бар'єрних функцій, методи приведених градієнтів і проєкцій градієнтів, методи модифікованих функцій Лагранжа та методи спроектованого лагранжіана.

Основна ідея методів модифікованих функцій Лагранжа полягає в тому, щоб звести пошук розв'язку НП-задачі до мінімізації без обмежень. При цьому деяку допоміжну функцію  $\Phi_U$  підбирають так, щоб не було невідвратної поганої обумовленості як в методах штрафних і бар'єрних функцій, так і розривності похідних як в методі негладких функцій [23].

Методи модифікованих функцій Лагранжа можна використовувати для розв'язку НП-задач як з обмеженнями-рівностями, так і з обмеженнями-нерівностями. Принцип врахування обмежень-рівностей завжди один і той же, а для обмежень-нерівностей можливі варіанти. Найчастіше використовується одна із стратегій прогнозування активного вибору, коли за певним правилом, на

початку кожного із циклів обчислень, визначається яке із обмежень-нерівностей буде активним і його слід включити в функцію  $\Phi_i$ . Остання умова і є основним недоліком методів модифікованих множників Лагранжа.

Алгоритми, які розв'язують послідовність підзадач з лінійними обмеженнями, цільові функції яких будуються на основі функцій Лагранжа, називають методами спроектованого лагранжіана [23].

Опишемо цей метод більш детально, оскільки він лежить в основі програми `fmincon`, яка входить в пакет `Optimization Toolbox MatLab` [160].

Отже, розв'язується така задача: знайти мінімум скалярної функції

$$\min : J(\bar{u}), \quad (4.19)$$

при обмеженнях

$$C_{eq}(\bar{u}) = 0, \quad (4.20)$$

$$\bar{l}b \leq \bar{u} \leq \bar{u}b, \quad (4.21)$$

де  $\bar{u}^T = (n_1, n_2, \dots, n_m)$ ;  $\bar{u}l^T = (n_{1,\min}, n_{2,\min}, \dots, n_{m,\min})$  і  $\bar{u}b^T = (\tilde{n}_{1,\max}, \tilde{n}_{2,\max}, \dots, \tilde{n}_{m,\max})$  - вектори;

$C_{eq}(\bar{u})$  - скалярна функція, яка визначається співвідношенням (4.18).

Функцію  $J(\bar{u})$  отримали із (4.16), враховуючи те, що задані технологічні параметри  $P_m$ ,  $T_m$ ,  $\varepsilon$  та параметри навколишнього середовища  $P_c$  і  $T_c$ . Тоді  $G_i(n_i) = \psi_1^{(i)}(n_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Аналогічно отримали функцію

$$C_{eq}(\bar{u}) = \sum_{i=1}^m k_i \cdot Q_i(n_i) - q, \quad (4.22)$$

де  $Q_i(n_i) = \psi_3^{(i)}(n_i)$ .

Зауважимо, що загальний вигляд функцій  $\psi_j^{(i)}(n_i)$  такий:

$$\psi_j^{(i)}(n_i) = A_{i,0}^{(j)} + A_{i,1}^{(j)} n_i + A_{i,2}^{(j)} n_i^2, \quad j = \overline{1, N}, \quad (4.23)$$

де  $A_{i,0}^{(j)}$ ,  $A_{i,1}^{(j)}$ ,  $A_{i,2}^{(j)}$  - коефіцієнти рівняння регресії, які отримані у результаті підстановки у рівняння (4.6) заданих технологічних параметрів та параметрів навколишнього середовища;

$N$  - кількість моделей для кожного із ВЦН,

Щоб спростити опис алгоритму розв'язку допустимо, що список активних обмежень-нерівностей відомий. Методи їх знаходження описані в [23, 161].

Двосторонні обмеження (4.21) перетворимо в односторонні

$$\bar{c}(\bar{u}) \leq \bar{0}, \quad (4.24)$$

$$\text{де } \bar{c}(\bar{u}) = (u_1 - u_{1,\max}, u_2 - u_{2,\max}, \dots, u_m - u_{m,\max}, -u_1 + u_{1,\min}, -u_2 + u_{2,\min}, \dots, -u_m + u_{m,\min})$$

Допустимо, що  $\bar{C}(\bar{u})$  - вектор-функція активних обмежень, які належать до обмежень (4.20) і (4.21). Тоді загальний вигляд підзадачі на  $k$ -тій ітерації має такий вигляд [23, 161]:

$$\Phi_{LC}(P) = \frac{1}{2} \bar{d}^T (H)_k \bar{d} + \nabla^T J(\bar{u}_k) \bar{d}. \quad (4.25)$$

Знайти *min* при обмеженнях

$$J(\bar{u}_k) \bar{d} = -\bar{C}(\bar{u}_k), \quad (4.26)$$

де  $H_k$  - матриця Гесе функції Лагранжа  $-L(\bar{u}, \bar{\lambda}) = J(\bar{u}) + \bar{\lambda}^T \bar{C}(\bar{u})$ ,

$J(\bar{u}_k)$  - матриця Якобі, що обчислена в точці  $\bar{u} = \bar{u}_k$ .

$\nabla J(\bar{u}_k)$  градієнт функції  $J(\bar{u})$ , який обчислений в точці  $\bar{u} = \bar{u}_k$ .

Підзадачу (4.25), (4.26) можна розв'язати як задачу квадратичного програмування. Її розв'язком буде вектор  $\bar{d} = \bar{d}_k$ , який використовується для формування нової ітерації  $\bar{u}_{k+1} = \bar{u}_k + \alpha_k \bar{d}_k$ .

Параметр крокової довжини  $\alpha_k$  визначається із умови мінімізації функції вартості (4.19) за параметром  $\alpha_k$  при збереженні обмежень (4.20)-(4.21).

Матриця Гесе обчислюється одним із квозіньютонівських методів. В програмі `fmincon` використана процедура під назвою Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS-процедура) [23, 161].

Програма `fmincon` знаходить розв'язок задачі оптимізації (4.19)-(4.21), починаючи з початкової точки  $\bar{u}^{(0)}$ . Вона оформлена у вигляді  $m$ -функції і має такий вигляд:

$$\begin{aligned} & [x, fval, exitflag, output, lumbda] = \\ & = f \text{ min con}(fun, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options, P1, P2, \dots), \end{aligned} \quad (4.27)$$



де, *fun* – *m*-файл, який вміщує функцію, що підлягає мінімізації;

*nonlcon* – *m*-файл, який вміщує нелінійні обмеження.

В лівій частині *m*-функції розміщені вхідні параметри:

*x* – значення параметру  $\bar{u}^*$ ;

*fval* – значення критерію оптимальності (4.19) в точці  $\bar{u} = \bar{u}^*$ ;

*exitflag* – індикатор розв'язку задачі (4.19)-(4.24), який приймає такі значення:

$$\text{exitflag} = \begin{cases} 1 & \text{- оптимізація успішного завершення;} \\ 0 & \text{- перевершено максимальне число ітерацій;} \\ -1 & \text{- мінімізація незавершена.} \end{cases}$$

*output* *t* – структура, яка містить інформацію про процес оптимізації.

**4.4.1. Програма оптимізації процесу компримування газу.** Програма оптимізації написана в системі Matlab і складається з файлу-сценарію (Script-файла) і *m*-файлів (Додаток С).

Є три типи *m*-файлів:

*m*-файли, які визначають обмеження температури газу на виході нагнітачів;

*m*-файли, які визначають обмеження температури газів за ТНТ;

*m*-файл, який розв'язує задачу оптимізації (4.19)-(4.26) за (4.27);

*m*-файл для (4.27) має таку структуру:

$$\begin{aligned} [x, Gval, \text{exitflag}] = \\ = \text{fmincom}(@\text{fun}_G, x0, [], [], [], [], lb, ub, @\text{fun}_{seq}, \text{options}, \text{zet}, \text{zet1}). \end{aligned} \quad (4.28)$$

Вхідний аргумент *options* використаний для того, щоб вказати, що великомасштабний алгоритм не використовується:

*options* = *optimset* ('LargeScale', 'off').

*m*-файл *fun\_G.m* вміщує інформацію про критерій оптимальності (4.16), а *m*-файл *fun\_seq.m* – інформацію про обмеження-рівність (4.18), яка повинна бути подана в такій формі:

$$\sum_{i=1}^m k_i \cdot Q_i(n_i) - q = 0.$$

**4.4.2. Розв'язок задачі оптимізації.** Розглянемо задачу оптимізації процесу компримування газу, коли працюють три агрегати на КС-3 “Долина”, які знаходяться у найкращому технічному стані (за результатами ранжирування) [152-153]. При цьому компримування газу відбувається за таких умов:

- температура газу на вході в нагнітачі  $T_m = 20^\circ\text{C}$ ;
- ступінь підвищення тиску газу -  $\varepsilon = 1.35$ ;
- тиск газу на вході в нагнітачі -  $P_m = 49 \text{ кгс/см}^2$  (4,9 Мпа);
- температура навколишнього середовища -  $T_c = 16^\circ\text{C}$ ;
- тиск навколишнього середовища -  $P_c = 729 \text{ мм.р.ст.}$ ;
- загальна продуктивність нагнітачів складає -  $Q_0 = 65100 \text{ ст.м}^3/\text{хв.}$

Обмеження на змінні задачі:

- температура газу на виході нагнітачів не повинна перевищувати  $+60^\circ\text{C}$ ;
- температура вихлопних газів не повинна перевищувати  $+650^\circ\text{C}$ .

Оскільки ГПА, які встановлені на КС оснащені газотурбінними приводами, а вартість одиниці об'єму газу, що йде на спалювання однакова для всіх приводів, то критерій оптимальності (4.21) вибраний в такому вигляді:

$$J(\bar{n}) = C_r \cdot (G_2(n_2) + G_3(n_3) + G_4(n_4)), \quad (4.29)$$

тобто критерій оптимальності  $J(\bar{n})$  - це загальні витрати газу на спалювання.

А обмеження задачі будуть такими:

$$\tilde{n}_{i,\min} \leq n_i \leq \tilde{n}_{i,\max}, \quad (4.30)$$

$$m \cdot (k_2 Q_2(n_2) + k_3 Q_3(n_3) + k_4 Q_4(n_4)) = Q_0. \quad (4.31)$$

Значення коефіцієнтів завантаження ГПА  $k_i$  розраховано в розділі 3.4 і мають такі значення:  $k_2 = 0,3347$ ;  $k_3 = 0,3333$ ;  $k_4 = 0,3318$ .

Результат розв'язку задачі (4.29)-(4.31):

$$n_2^* = 4800, \text{ об/хв,}$$

$$n_3^* = 5040, \text{ об/хв,}$$

$$n_4^* = 4810, \text{ об/хв.}$$

Вартість роботи агрегатів складає:

$$J(\bar{n}^*) = 3.69 \text{ грн/с.}$$

Отже, загальна вартість роботи агрегатів складає  $J(\bar{n}^*) = 3.69$  грн/с при транспортуванні газу  $1085 \text{ ст.м}^3/\text{с}$ . За результатами спостереження для таких же початкових умов отримана вартість роботи без оптимізації, яка рівна  $3.88$  грн/с. Таким чином, економія становить  $0.19$  грн/с, або  $0.19$  грн на транспортування  $1000 \text{ ст.м}^3$  газу.

#### 4.5 Оцінка економічної ефективності розробленої системи оптимального керування роботою ГПА

Вдосконалення системи керування веде до зміни вартості обладнання, роботи обслуговуючого персоналу і технологічного обладнання. Ці зміни зумовлюють вплив на економічні показники підприємства, економіку виготовлення певного продукту чи виконання конкретних робіт, техніко-економічні показники. Основним показником, за яким можна оцінити величину такого впливу є розмір прибутку чи економії.

На зміну прибутку впливає ряд факторів, які, в свою чергу, зумовлені цілою низкою зовнішніх причин. Вихідними факторами, що збільшують прибуток, є зменшення затрат на виробництво (одинична собівартість  $C_{oo}$ ), збільшення ціни ( $\Pi$ ) або ріст об'ємів продукції ( $Q$ ) [163]

$$\Pi_p = Q \cdot (\Pi - C_{oo}), \quad (4.32)$$

де  $\Pi_p$  – розмір прибутку, грн.

Зменшення собівартості досягається скороченням експлуатаційних витрат внаслідок вдосконалення керування технологічним процесом.

Зменшення собівартості одиниці переробленої продукції визначається за формулою [163]:

$$\Delta C = C_{\text{баз}} - C_{\text{нов}},$$

Вдосконалення системи автоматизації дає зменшення вартості роботи агрегатів для транспортування 1000 ст.м<sup>3</sup> газу із  $C_{\text{баз}}=3.88$  грн до  $C_{\text{нов}}=3.69$  грн. Таким чином, зменшення собівартості одиниці продукції (транспортування 1000 н.м<sup>3</sup> природного газу) складає:

$$\Delta C = 3.88 - 3.69 = 0.19 \text{ грн.}$$

Тепер можна визначити прибуток від введення в експлуатацію нової системи автоматизації. В нашому випадку вираз (4.32) набуде такого вигляду:

$$Pr = Q \cdot \Delta C,$$

де  $Q=20$  млрд.м<sup>3</sup> – продуктивність компресорної станції, ст.м<sup>3</sup>/рік.

Отже, прибуток від введення в експлуатацію нової системи оптимального керування складе:

$$Pr = 20 \cdot 10^6 \cdot 0.19 \approx 3 \text{ млн. 800 тис. грн.}$$

Розрахунок економічного ефекту базується на підвищенні витрат на юзробку та впровадження нової системи автоматизації.

У загальному випадку ефективність такого заходу оцінюється за допомогою такого виразу [163]

$$E_p = ((C_{\text{од}}^1 + E_n \cdot K_1) - (C_{\text{од}}^2 + E_n \cdot K_2)) \cdot Q,$$

де  $E_p$  – річний економічний ефект, грн.;

$C_{\text{од}}^1, C_{\text{од}}^2$  – базова та нова собівартість продукції, відповідно, грн.;

$K_1, K_2$  – питомі капіталовкладення для базового (нового) варіанту, грн.;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності,  $E_n = 0,15$ .

Для нашого випадку економічний ефект визначається за допомогою такого рівняння

$$E_p = (C_{\text{од}}^1 - C_{\text{од}}^2) \cdot Q + E_n \cdot (K_1 - K_2),$$

або

$$E_p = Pr - E_n \cdot Q \cdot K,$$

де  $K = 100000$  грн – одноразові капіталовкладення в нову систему, які складаються із вартості програмного та апаратного забезпечення.

Тоді, 
$$E_p = 3800000 - 0.15 \cdot 100000 = 3785000 \text{ грн.}$$

Отже, річний економічний ефект від впровадження системи оптимального керування складає 3785000 грн.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Виявлені вхідні і вихідні параметри ГПА як об'єкта керування. Було враховано вплив навколишнього середовища на процес компримування газу, завдяки чому вдалось підвищити точність моделей в порівнянні з моделями, які пропонувались іншими авторами.

2. Отримані емпіричні моделі за допомогою індуктивного методу моделювання, який заснований на принципі самоорганізації і мінімального обсягу апріорної інформації про об'єкт, що дало змогу побудувати адекватні емпіричні моделі процесу компримування газу.

3. Формалізовано задачу оптимального керування процесом компримування природного газу, в структуру якої входить критерій оптимальності, обмеження на керуючі дії, коефіцієнти завантаження ГПА на основі їх технічного стану, що дало змогу обґрунтовано вибрати стратегію розв'язку задачі оптимального керування.

4. Розроблений метод розв'язку задачі оптимального керування процесом компримування природного газу допускає, що така задача вирішується як дворівнева – на першому із них обчислюється необхідна кількість агрегатів, а на другому – вибирається частота обертання роторів відцентрових нагнітачів із урахуванням коефіцієнтів їх завантаження, що приводить до зменшення власних затрат до 0,19 грн на компримування 1000 ст.м<sup>3</sup> природного газу.

## РОЗДІЛ 5

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ  
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМИ АГРЕГАТАМИ

## 5.1. Структура системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами з урахуванням їх технічного стану

Система оптимального керування ґрунтується на вже існуючій системі керування роботою КС (рис. 5.1), яка забезпечує оперативно-диспетчерське керування компресорними агрегатами в реальному часі. Автоматизована система керування технологічними процесами КС призначена для керування технологічними процесами у складі інтегрованої системи керування ЛВУМГ [164].

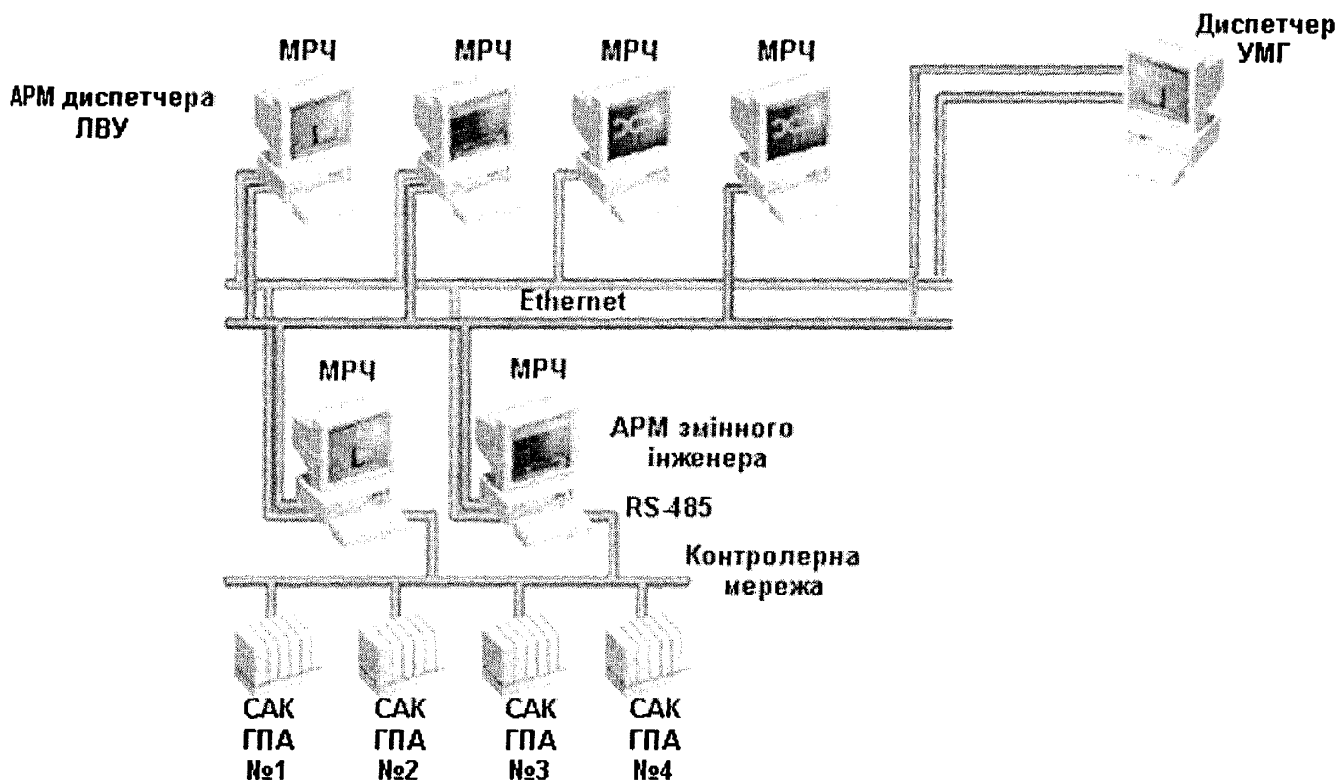


Рис. 5.1. Структура системи керування КС

Об'єктами автоматизації є основне та допоміжне технологічне устаткування КЦ, а також технологічні процеси, які реалізуються за допомогою цього обладнання. При створенні АСУТП КЦ у неї закладені можливості дистанційного керування технологічним устаткуванням цеху і режимами його функціонування, які дозволять в майбутньому перейти до експлуатації цеху без присутності постійного оперативного персоналу.

Система керування ЛВУ має чотирирівневу ієрархічну структуру. Перший рівень містить контролери, які виконують функції локального керування компресорними агрегатами (САК ГПА).

На другому рівні керування знаходяться функціонально-орієнтовані автоматизовані робочі місця (АРМ) для реалізації оперативного керування агрегатами КС.

Третій рівень керування - це рівень диспетчера ЛВУ, на якому розв'язуються задачі оптимізації та розрахунку техніко-економічних показників роботи КС на рівні ЛВУ.

Інформація з рівня ЛВУ передається диспетчеру УМГ (четвертій рівень) для оперативно-тактичного планування роботи транспортної системи УМГ.

## **5.2. Апаратне та програмне забезпечення системи керування роботою компресорної станції**

### **5.2.1 Апаратне забезпечення системи.**

Апаратне забезпечення системи керування роботою компресорної станції на нижньому рівні складається з програмованих логічних контролерів (ПЛК) "GE FANUC" 90-70 і 90-30, які зв'язані між собою по мережі "Genius" в межах компресорної станції [23]. Вони призначені для збору та попередньої обробки інформації, яка надходить від первинних давачів об'єкта керування (САК ГПА), та видачі керуючих сигналів на виконавчі механізми ГПА. Обробка та видача сигналів відбувається згідно

пакету прикладних програм, що реалізують вимоги по контролю та управлінню САК ГПА. Для програмування використовується мова LD (Ladder Diagram) - графічна мова програмування, яка є стандартизованим варіантом класу мов релейно-контактних схем (стандарт ІЕС 1131-3). Розширення функціональних можливостей досягається засобами у вигляді функціональних блоків, що згруповані в функціональні групи. Базовими є такі функціональні розділи: таймери, лічильники, комутатори, математичні, алгебраїчні, бітова обробка даних, пересилки даних, конверсія, контроль (ПД-регулятори), розгалуження та передачі даних. Таким чином, програмні можливості з обробки інформації є достатніми для автоматизації складних технологічних об'єктів, якими є КС.

Автоматизовані робочі місця інженерно-технічного персоналу КС та АРМ диспетчера ЛВУ об'єднані у мережу Ethernet при допомозі відповідного інтерфейсного обладнання та програмного забезпечення. Інформаційний зв'язок диспетчерів ЛВУ та УМГ підтримується через стандартні кабельні, традиційні телефонні канали зв'язку чи GSM-каналами з використанням серійних промислових модемів та сервісного програмного забезпечення обміну даними.

**5.2.2 Аналіз програмного забезпечення верхнього рівня системи.** Для забезпечення реальної і ефективної автоматизації виробничих і технологічних процесів в промисловості, управління промисловим підприємством, оперативного отримання, збереження і аналізу інформації необхідне створення єдиної інформаційної системи, яка б пронизувала всі підрозділи підприємства і пов'язувала їх в єдиний механізм, що дозволяє отримувати точну, достовірну інформацію на всьому шляху виробництва від сировини до кінцевої продукції. Доступ з будь-якого комп'ютера підприємства до інформації, яка надходить від виробничого технологічного процесу, від будь-якої підсистеми є насущною необхідністю. Одним з основних компонентів АСУ ТП, здатним надавати технологічну інформацію, є додаток SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA-системи є одним з провідних програмних продуктів для



жстем моніторингу, управління і збору даних.

Програмне забезпечення рівня SCADA виконує такі функції:

- Візуалізація інформації про процес;
- Обмін з контролерами в реальному часі;
- Архівування інформації;
- Документування процесу;
- Одержання і передача інформації в інші програмні пакети;
- Неоперативна обробка інформації;
- Керування тривогами.

Для розв'язку типових задач автоматизації технологічних процесів і для проектування верхнього рівня систем на даний час може бути використана велика кількість пакетів інструментального програмного забезпечення (ІПЗ). До основних пакетів ІПЗ можна віднести такі:

- InTouch (Wonderware) - США;
- Citect (CI Technology) - Австралія;
- FIX (Intellution) - США;
- Genesis (Iconics Co) - США;
- Factory Link (United States Data Co) - США;
- RealFlex (BJ Software Systems) - США;
- Sitex (Jade Software) - Великобританія;
- TraceMode (AdAstrA) - Росія;
- Simplicity (GE Fanuc) - США;
- САРГОН (НВТ - Автоматика) - Росія.

5.2.2.1 Опис та основні можливості SCADA-система Citect. SCADA-жстема Citect фірми Citect є одним з провідних програмних продуктів для жстем моніторингу, керування і збору даних.

На даний час до систем управління ставляться вимоги не тільки максимальної продуктивності і мінімальної ціни, але й адаптованості до майбутньої модернізації підприємства — кардинальної чи поступової. Останнє особливо актуальне для вітчизняного ринку. Системи, побудовані на базі SCADA-системи Citect (надалі Citect), задовольняють наведеним вимогам завдяки двом принципам їх організації: масштабованій архітектурі і її відкритості.

Масштабована архітектура — це клієнт-серверна архітектура, в якій Citect-сервер розподілено на п'ять серверів у відповідності до п'яти задач, які він може виконувати:

- сервер вводу/виводу (може бути і як інтернет-сервер Citect);
- сервер трендів;
- сервер тривоги;
- сервер звітів;
- сервер синхронізації часу.

Перевага, яку отримує користувач, — вибір масштабу системи автоматизації. Якщо дозволяє бюджет, технологічний процес можливо автоматизувати повністю. Якщо виділених коштів недостатньо, можливо автоматизувати невелику ділянку виробництва чи окрему технологічну операцію, а потім, у відповідності до плану і бюджету, розширювати систему без заміни обладнання, програмного забезпечення і системної конфігурації.

Відкритість архітектури Citect полягає в тому, що Citect — це не готове програмне забезпечення (ПЗ), яке потрібно налаштувати і конфігурувати. Це інструмент для створення додатків (проектів) автоматизації технологічних процесів, — середовище розробки і середовище виконання, тобто середовище, в якому ці додатки можуть працювати.

ПЗ Citect працює під управлінням ОС Windows і підтримує всі сучасні технології, запропоновані компанією Microsoft. Повна сумісність з продуктами Microsoft Office і MES (Manufactory Executive Systems) дозволяє

використовувати продукти Citect для створення сучасних інформаційних систем управління виробництвом.

Перевага, яку отримує користувач, полягає в тому, що він може швидко і недорого створювати сучасні системи автоматизації і модернізувати їх своїми силами.

До особливостей Citect можна віднести наступні:

– **Гнучкість** – це можливість модифікації системної архітектури. Замість того, щоб прив'язувати користувача до якої-небудь однієї схеми, Citect дає йому можливість самому вибирати архітектуру – використовувати все краще, що є в централізованій і розподіленій обробці.

– **Масштабованість системи.** Це означає, що розроблений проект можна випробувати на одному комп'ютері чи маленькій мережі і потім розширювати систему (у відповідності до програми розвитку, бюджету, тощо) без заміни обладнання, програмного забезпечення і системної конфігурації.

– **Відкрита архітектура,** тобто підтримка відкритих технологій, стандартів і обладнання. Системи автоматизації на базі продукту Citect не є "річчю в собі". В процесі розвитку нових технологій можна постійно модернізувати і масштабувати цю систему (в залежності від потреб і наявності коштів) силами своїх спеціалістів, без здійснюючи глобальних змін самої системи.

– **Резервування.** Тобто механізм повного і багаторазового резервування поряд з використанням розподіленої обробки даних в мережі надає користувачу велику гнучкість в розгортанні системи автоматизації.

– **Висока продуктивність** визначається тим, що SCADA-система Citect побудована на базі мультизадачного ядра реального часу. SCADA-система Citect може працювати з великими об'ємами даних і при збільшенні кількості параметрів час відгуку змінюється незначно. Протягом однієї секунди Citect може опитувати 5000 точок в мережевому режимі з декількома станціями.

– Система захисту від несанкціонованого доступу в Citect реалізована на базі паролльної системи і дозволяє організовувати в системі групи користувачів з різними правами під час роботи з системою.

– Підключення до зовнішніх систем. Citect може підключатися до таких комп'ютерних систем, як DEC PDP/VAX/ALPHA, IBM AS400, UNIX, SUN. Citect постачається з більш ніж 120 драйверами вводу/виводу. Всі ці драйвери 32-розрядні і забезпечують підключення пристроїв біля 300 типів: ПЛК, RTU, мікроконтролери, контролери контурів регулювання, елементи розподілених систем, ваги, зчитувачі штрих-кодів, лабораторні аналізатори, тощо.

Для інтеграції технологічних даних з рівня різних SCADA-систем з MES і ERP системами компанія CiTECT пропонує новий продукт **Plant2Business**. Компонент Plant2Business Server є основою Plant2Business Solutions. Це споріднений SCADA-системі Citect продукт, який видаляє технічні і технологічні бар'єри, дозволяючи здійснювати доступ до технологічної інформації, яка є прерогативою SCADA-системи. Це "міст", який з'єднує різні джерела даних. Plant2Business Server може взаємодіяти з Citect, базами даних Oracle, SQL, виступаючи в ролі перекладача і забезпечуючи взаємодію цих баз даних між собою. Plant2Business Server дозволяє комбінувати дані з різних джерел і передавати їх на рівень системи управління підприємством.

Програмні продукти компанії Citect представляють собою інтегрований набір засобів розробки додатків, який використовується для створення систем промислового контролю і накопичення даних; для комп'ютеризованих засобів регулювання параметрів обладнання і технологічних процесів; для ведення реляційних баз даних реального часу; для перегляду інформації з мереж Internet та Intranet, а також підтримки до декількох сотень драйверів, які з'єднують прикладні системи з технологічними датчиками.

### 5.3. Спеціальне програмне забезпечення системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами

**5.3.1. Структура спеціального програмного забезпечення.** Інформація про хід технологічного процесу на автоматизованому робочому місці змінного інженера та диспетчера відображається при допомозі базового програмного забезпечення Citect, яка обмінюється з прикладними програмами, розробленими для КС та окремих агрегатів.

На рівні диспетчера ЛВУ, крім традиційного, розроблене спеціальне програмне забезпечення розв'язку задачі оптимального керування (рис.5.2), яке оформлене у вигляді окремого модуля, що дозволяє легко інтегрувати його в існуючий пакет програм [166].

Прикладна програма забезпечує функції вибору та відображення інформації на екрані монітора АРМ. За допомогою функціональних клавіш, які розміщені на оглядовому відеокадрі, оператор може викликати відеокадри параметрів, мнемосхем, пультів, графіків, щоденників подій та інше.

Програмне забезпечення задачі оптимального керування оформлене у вигляді прикладного програмного модуля оптимального керування (ППМОК), в який інтегрована низка програмних продуктів, розроблених у середовищах MatLab, Excel та Delphi [167].

Всі програмні продукти, об'єднані інтегратором, який написаним на об'єктно-орієнтованій мові Delphi. Він оформлений у вигляді об'єктного вікна в Citect і дозволяє зручно відслідковувати технологічний процес у реальному масштабі часу.

В загальному ППМОК забезпечує реалізацію таких функцій:

- збір та обробку даних про технологічні параметри;
- відображення значень контрольованих параметрів;
- прийом в реальному часі інформації про хід технологічного процесу;
- розрахунок коефіцієнтів завантаження;
- визначення оптимальної частоти обертання нагнітачів.

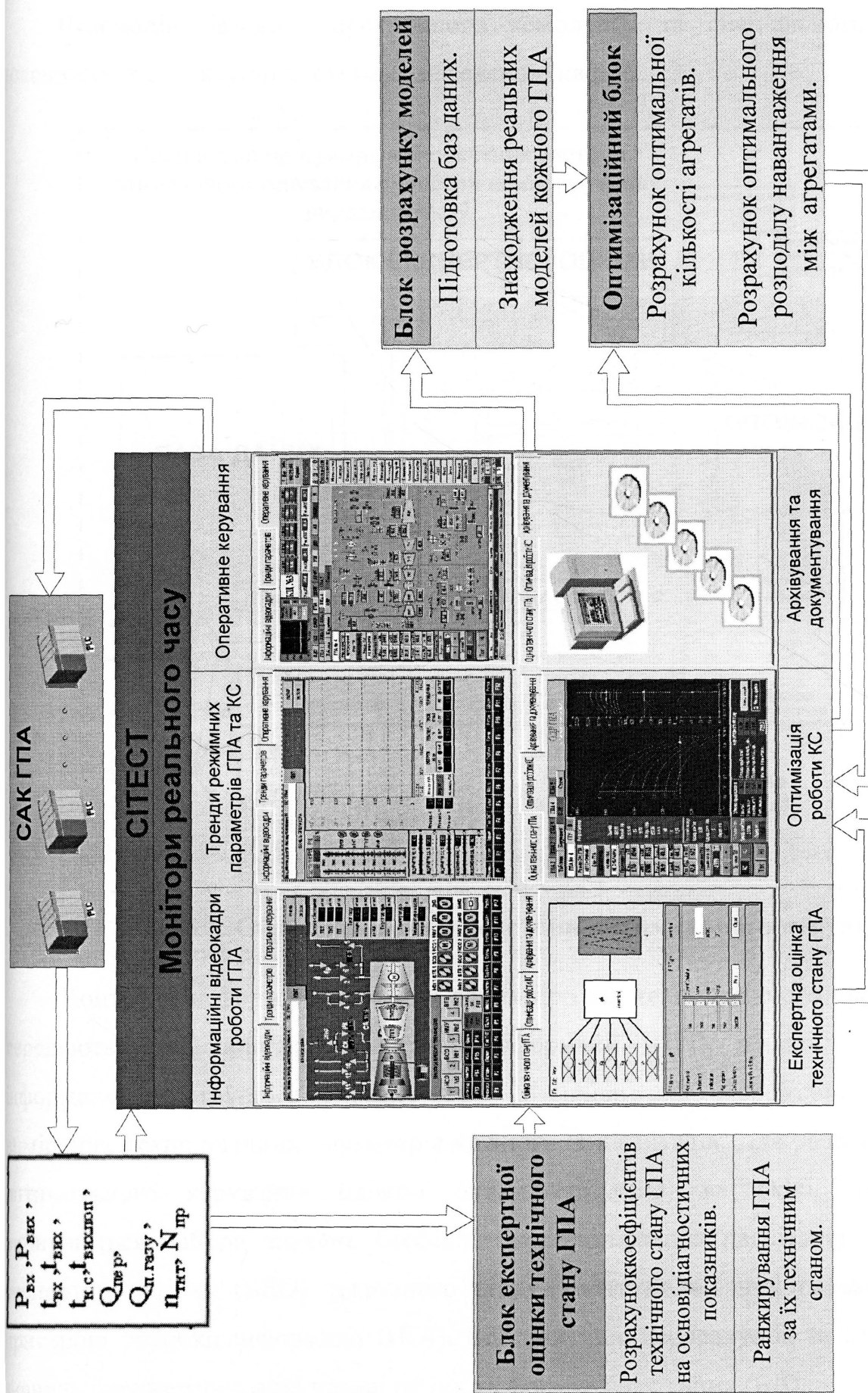


Рис. 5.2. Структура програмного забезпечення задачі оптимального керування роботою ГПА

Взаємодія базового програмного комплексу та спеціального модуля пояснюється структурною схемою, наведеною на рис. 5.3.

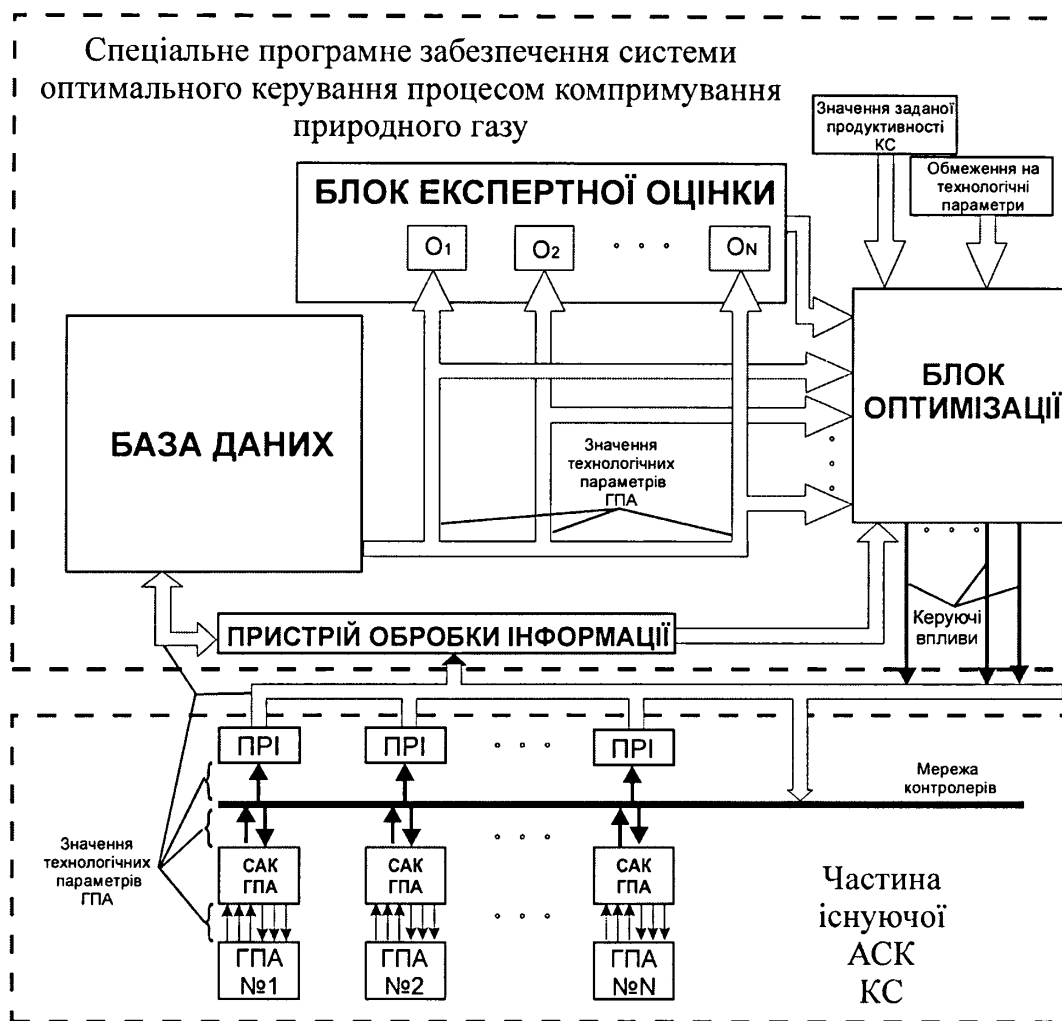


Рис. 5.3. Структурна схема системи оптимального керування

Контролери формують масиви даних про хід технологічного процесу, які передаються на пристрій реєстрації інформації (ПРІ), в якому отримана інформація реєструється і записується в архіви для збереження значення вимірних технологічних параметрів кожного із нагнітачів. Для розв'язку задач оптимального керування блоком оптимізації (БО) як вхідні параметри вибираються набори значень коефіцієнтів завантаження нагнітачів від блоку експертної оцінки (БЕО) технічного стану, та технологічних параметрів від пристрою обробки інформації (ПОІ). Він здійснює перерахунок та приведення значень параметрів в одні часові рамки та формує базу даних (БД).

Розглянемо детальніше структуру бази даних, яка використовується для збереження інформації та організацію подальшої роботи із нею.

Сукупність таблиць, із яких складається вищезгадана база даних, умовно можна поділити на два типи: *службові* – містять інформацію про структуру самої бази даних, призначення таблиць, перелік параметрів, що вимірюються, тощо;

- *параметричні* – включають в себе набір значень деякого параметра, вимірюваного в певні часові інтервали.

До службових таблиць належать:

DATES.DB – містить перелік параметрів та дат, коли зроблені вимірювання;

HOURS.DB – вказує перелік часових інтервалів (початкова – кінцева години), в межах яких робилися вимірювання;

PARPRINT.DB – набір параметрів, друк яких підтримується системою;

PARAMETR.DB – включає в себе наступні поля:

- ім'я параметра;
- розмірність;
- тип;
- системне ім'я;
- межі допустимих значень;
- межі генерації повідомлень про помилку;
- ознаку обчислення;
- формули для обчислення параметрів;
- імена каталогів, в яких розташовуються таблиці із наборами значень деякого параметра за певні календарні числа;

В головній директорії модуля знаходиться підкаталог Tables, вміст якого являється сукупністю каталогів із назвами позначень таблиць із інформаційних баз даних. Кожен такий каталог підкаталогу Tables містить набір таблиць із значеннями відповідного параметра за деяку календарну дату. Всі параметричні



таблиці мають однакову структуру і складаються із наступних полів:

- номер вимірювання;
- дата;
- час вимірювання;
- значення вимірюваного параметра.

Ім'я параметричних таблиць будується за формулою 'параметр'+ 'дата'+ 'година'. Наприклад, таблиця T1(DPCONFS)\060510\_213337 містить набір значень перепаду тиску на конфузори, виміряних до 10-ого травня 2006 року до 21-ої години 33-ої хвилини.

Застосування такого підходу до формування імен таблиць дозволяє досить легко орієнтуватися людині-оператору в сукупності архівних даних, збережених обчислювальною системою.

Для під'єднання до БД використовується стандартний механізм з'єднання ODBC (open database connectivity – відкритий зв'язок з базами даних). Однією із головних переваг даного механізму є можливість використання єдиного уніфікованого інтерфейсу доступу до даних незалежно від типу джерела, з яким здійснюється взаємодія. Реалізація ODBC в MFC (Microsoft Foundation Class) передбачає використання класів бази даних (CDatabase), наборів записів (CRecordset) і представлення записів (CRecordView).

Клас CDatabase представляє собою абстракцію з'єднання з базою даних ODBC. Перед тим, як можна буде використовувати інші класи і методи бази даних, необхідно відкрити сам об'єкт CDatabase.

Таким чином, з'єднання з кожною із зазначених таблиць здійснюється за допомогою механізму ODBC, викликаючи метод OpenEx класу CDatabase.

Наведемо приклад під'єднання до таблиці бази даних із наборами значень кількості обертів валу нагнітача (N):

```
try {
    CDatabase db_N;
    CString connect;
    connect+="DRIVER={Driver do Microsoft Paradox (*.db)}";
    connect+="DBQ=";
    connect+=path_to_N; // шлях від інтерфейсного модуля
```

```

    db.OpenEx(connect);
}
catch (CDBException *xcp) {
    cerr << _T("Database exception: ")
        << (const TCHAR *) xcp->m_strError << endl;
    xcp->Delete();
}

```

Переміщення по записах таблиці реалізується за допомогою методу MoveNext() класу CRecordset, при цьому при досягненні кінця таблиці метод IsEOF() цього ж класу повертає значення TRUE. Альтернативою IsEOF() являється метод GetRecordCount(), що повертає число записів в таблиці, з якою зв'язаний об'єкт класу CRecordset.

Наведемо фрагмент програмного коду, що використовується для запуску математичного блоку – програми IndKomp.exe:

```

PROCESS_INFORMATION proInfo ;
STARTUPINFO startInfo ;
// шлях до виконавчого файлу
char mod[] = "C:\\...\\indkomp.exe";
// підготовка до створення процесу
startInfo.cb = sizeof(STARTUPINFO);
startInfo.cbReserved2 = 0;
startInfo.lpTitle = NULL;
startInfo.dwX = CW_USEDEFAULT;
startInfo.dwY = CW_USEDEFAULT;
startInfo.dwXSize = CW_USEDEFAULT;
startInfo.dwYSize = CW_USEDEFAULT;
startInfo.dwXCountChars = 0;
startInfo.dwYCountChars = 0;
startInfo.lpReserved2 = NULL;
startInfo.lpReserved = NULL;
startInfo.lpDesktop = NULL;
startInfo.dwFlags = STARTF_USEFILLATTRIBUTE ||
                    SW_MINIMIZE || SW_HIDE;

// запуск процесу
CreateProcess( mod, NULL, NULL, NULL, FALSE, 0, NULL,
NULL , &startInfo , &proInfo );

```

Після виконання зазначених дій запускається математичний блок ідентифікації параметрів математичних моделей нагнітачів, який входить до оптимізаційного модуля програми, і є окремою самостійною процедурою із графічним інтерфейсом. Він створений засобами математичного пакету MatLab а переведений на мову C++ вбудованим компілятором системи msc (MatLab C compiler).

Оскільки алгоритми, що реалізують розрахунок параметрів процесу компримування природного газу, реалізовані у вигляді окремих файлів-сценаріїв системи MatLab, що повинні запускатися в строго визначеній послідовності, то для їх консолідації в єдине ціле на базі існуючого графічного інтерфейсу використовуються наявні вбудовані засоби даного математичного пакету.

Як головний сценарій, навколо якого об'єднуються всі інші модулі, вибрано процедуру початкової ініціалізації IndKomp. На початковому етапі роботи, описаний сценарій зчитує із бінарного файлу `input.bin`, набори значень параметрів та поміщає їх у власні внутрішні структури даних – масиви.

Враховуючи наведений раніше формат бінарного файлу, зчитування значень відповідних параметрів здійснюється наступною послідовністю команд сценарію IndKomp середовища Matlab:

```
fid = fopen('input.bin', 'rb');
[N, count] = fread(fid, 1, 'float64');
fclose(fid);
```

Створення графічного інтерфейсу для відображення результатів обчислень та забезпечення можливості діалогової взаємодії з користувачем здійснюється за допомогою типових елементів управління, що підтримуються будь-якою високорівневою мовою програмування.

Для створення вікна головної програми в середовищі Matlab використовується функція `figure`, параметрами якого є координати початкового розташування вікна, тип границь, заголовок вікна тощо. Як результат своєї роботи функція повертає дескриптор вікна, який в подальшому використовуватиметься при створенні елементів управління.

Як приклад, наведемо фрагмент коду сценарію IndKomp, в якому створюється головне вікно програми:

```
hFig=figure('Position', [200 150 700 500], 'Resize',
'off', 'Name', 'Adaptor', 'NumberTitle', 'off');
```

Безпосереднє створення елементів управління в середовищі MatLab здійснюється за допомогою команди `icontrol`. Параметри цієї функції дають

можливість створити елемент управління необхідного класу і налаштувати його властивості відповідно до наших потреб. Графічний інтерфейс математичного модуля включає в себе елементи управління всіх описаних вище типів.

Як приклад використання функції `uicontrol`, наведемо фрагмент програмного коду сценарію `IndKomp`, в якому створюються елементи управління різноманітних типів:

```
hFrame(1)=uicontrol(hFig, 'Style', 'frame',
    'Position',[270 250 260 200], 'Visible',
    'off','BackgroundColor', [0.769 0.78 0.851]);
hStaticLine(1)=uicontrol(hFig, 'Style', 'text',
    'BackgroundColor', [0 0 0],
    'Position', [180 0 1 510]);
hButton(1)=uicontrol(hFig, 'Style', 'pushbutton',
    'String', 'Ідентифікація1',
    'Position', [30 400 120 50],
    'Callback', 'ident1',
    'BackgroundColor', [0.769 0.78 0.851]);
hEdit(1)=uicontrol(hFig, 'Style', 'edit',
    'Position', [300 330 60 25],
    'BackgroundColor', 'white',
    'HorizontalAlignment', 'left',
    'Enable', 'off', 'Visible', 'off');
```

Результати роботи математичного модуля відображаються не лише у вигляді текстової інформації (за допомогою списків), а й у вигляді графіків. Для забезпечення такої можливості в сценарії `IndKomp` використовуються спеціальні об'єкти `axes`, що представляють собою форму із розміткою для відображення графіків. З кожним із таких об'єктів асоціюється окремий об'єкт-графік, дескриптор якого повертається функцією `plot`. Варто зазначити, що вивід будь-якого графіка завжди здійснюється в поточний об'єкт `axes`.

Таким чином, процес відображення графічної інформації умовно можна розбити на такі кроки:

- 1) вибір необхідної форми (об'єкта `axes`) для відображення графіка;
- 2) безпосередня побудова графіка за допомогою функції `plot` та збереження його дескриптора;
- 3) відображення у вікні відповідної форми та графіка за допомогою встановлення властивості `Visible` в `on` функцією `set`.

Фрагмент коду сценарію IndKomp, що реалізує описані кроки:

```
axes(hAxes(5));
hplot(:,5)=plot(tf,HP,tf,h,'+');
set(hplot(:,5), 'Visible', 'on');
set(hAxes(5), 'Visible', 'on');
grid on;
```

Реакція елементів управління головного вікна математичного модуля на дії користувача здійснюється на основі типового механізму обробки подій. Властивість Callback кожного елемента управління задає функцію, що використовується для обробки подій від даного елемента.

Для створення виконавчого файлу на основі сценаріїв математичного пакету MatLab, використовується вбудований компілятор msc, параметрами якого є імена усіх складових файлів проекту, при цьому основний сценарій вказується першим.

Таким чином, створення ехе-файлу на основі сценаріїв математичного блоку здійснюється за допомогою командного рядка виду:

```
mcc -m -B sglcpp -L Cpp IndDril ident1 ident2 check optimdril
clearall dril_subcont_1 spid_orto onexit rad radoptim fun_sum
fun_ind fun_VV fun_VK fun_HP fun_start fun_s fun_fs fun_pr fun_prl
fun_SubCon_1 fun_g fun_V0 fun_Ke fun_Kq hamfun fun_tb fun_Kel
fun_V01 fun_Kq1
```

Отже, задача по передачі управління математичному блоку фактично полягає в запуску одержаного ехе-файлу. Сценарії математичного модуля читають набори значень параметрів із відповідного бінарного файлу, сформованого на початковому етапі і реалізують подальшу їх обробку, відображаючи результати у вигляді графіків, значень визначених параметрів та рекомендацій.

Оптимізаційний блок розв'язує задачу мінімізації енерговитрат на привод паралельно працюючих компресорних агрегатів з врахуванням завдання на перекачування, низки обмежень на режимні параметри та технічного стану, який визначається блоком експертної оцінки технічного стану. Таким чином, загальна задача оптимального керування розбита на кілька етапів:

- формування бази даних для побудови математичних моделей;
- ідентифікація параметрів математичних моделей нагнітачів;
- визначення коефіцієнтів технічного стану кожного із нагнітачів;
- знаходження оптимальної кількості працюючих агрегатів для забезпечення заданої продуктивності при номінальних частотах обертання нагнітачів;
- оптимальний розподіл навантаження за частотою обертання  $n_{ij}$  між працюючими агрегатами.

Запуск кожного етапу здійснюється віртуальними кнопками вікна оптимального керування. Там же задаються в контекстних меню необхідні дані для задачі оптимізації: тарифи на спалюваний газ, запланований об'єм перекачки, тиск на виході КС, ресурс оптимізації по кількості робочих агрегатів тощо.

**5.3.2 Інтегратор задачі оптимального керування.** Об'єднання окремих програмних модулів задачі оптимального керування здійснюється спеціальною програмою-інтегратором. Для розробки програми – інтегратора використано мову об'єктно-орієнтованого програмування Delphi. Перевагою Delphi як мови програмування, є те, що користувачу немає необхідності створювати свої класи, оскільки вони уже створені і готові до використання.

Концепція візуального програмування є складовою об'єктно-орієнтованого підходу. Основним завданням, яке ставилось при розробці програми - інтегратора – можливість керувати роботою програмних продуктів MATLAB, MS Excel і зв'язок із SCADA – системою.

Це завдання було розв'язане наступним чином:

– керування роботою і передача даних в MATLAB здійснюється за допомогою надбудови модуля Excel Link в MS Excel, що поєднує програми розроблені в них у єдине обчислюване середовище на платформі Windows. Excel link дозволяє обмінюватися і синхронізувати дані між цими середовищами за

допомогою функцій Excel Link з робочого листа Excel чи макрокоманд, як у даному випадку.

– зв'язок із верхнім рівнем здійснюється через DDE (Dynamic Data Exchange) обмін. МРЧ може виступати і як DDE-сервер, так і як DDE-клієнт і підтримує три режими обміну: ADVISE, POKE, REQUEST. В даному випадку Citect є DDE-сервером, і монітор реального часу виконує наступні операції:

- a. відсилання реальних значень каналів програмі зі своєї ініціативи (режим ADVISE);
- b. зміну значення атрибутів каналів по команді іншої програми – режим POKE;
- c. відсилання значення будь-яких атрибутів каналів за запитом іншої програми – режим REQUEST.

Програми модуля оптимального керування працюють в режимі порадики. Запуск інтегратора здійснюється натисканням кнопки 'OK' (оптимальне керування) в панелі інструментів (рис. 5.4) чи за викликом із програми верхнього рівня. При цьому на екрані відображається форма, зображена на рис. 5.5.

Це основна форма, яка має робочу назву "Optimizer". Однією з основних властивостей форми є властивість Show Modal; при заданому їй значенні True, дозволяє зробити форму модальною, тобто поки форма відкрита, інші програмні компоненти залишаються недоступні.

Дане вікно (рис. 5.4) дозволяє вибрати окремі ГПА (кнопки "ГПА1"..."ГПА5") для перегляду та розрахунків їхніх параметрів ("Параметри", рис. 5.5), а також визначення оптимального режиму роботи компресорної станції в цілому (кнопка "Оптимізація").

При натисненні на кнопку "Вимір" заповнюються текстові поля форми, які відповідають параметрам, що вимірюються штатною апаратурою. До них відносяться: частота обертання ротора нагнітача, тиск і температура газу на вході та виході нагнітача, температура відпрацьованих газів, а також параметри навколишнього середовища – тиск та температура.

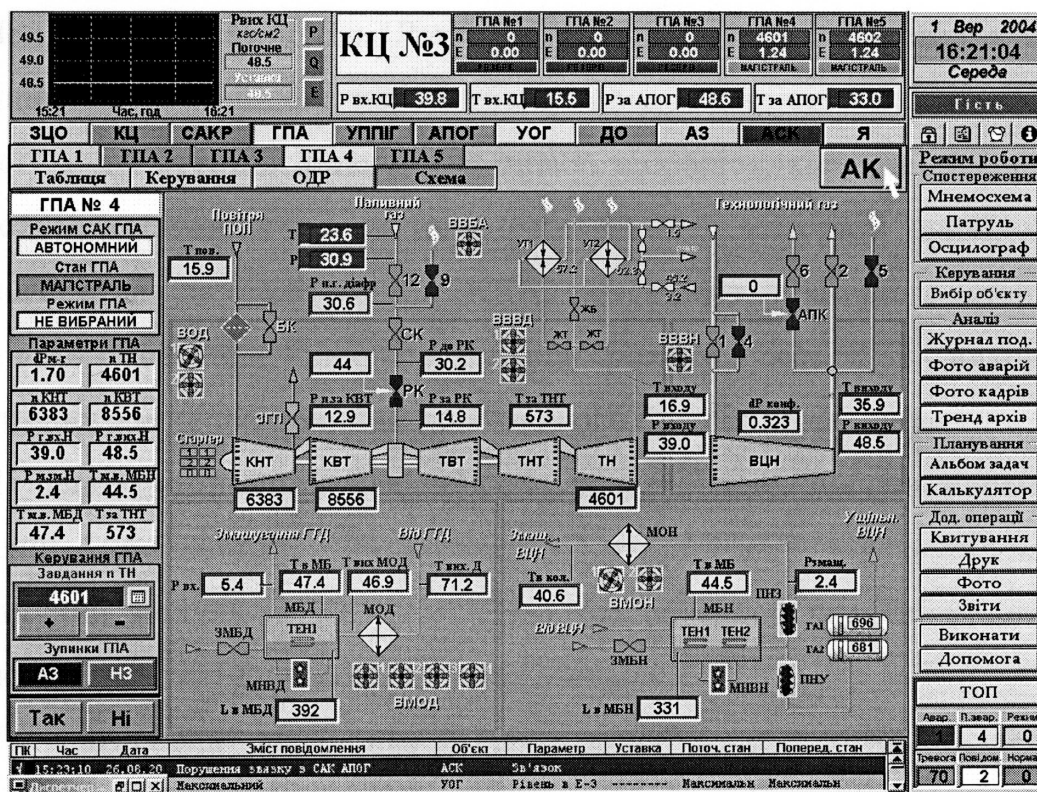


Рис. 5.4. Запуск модуля оптимального керування

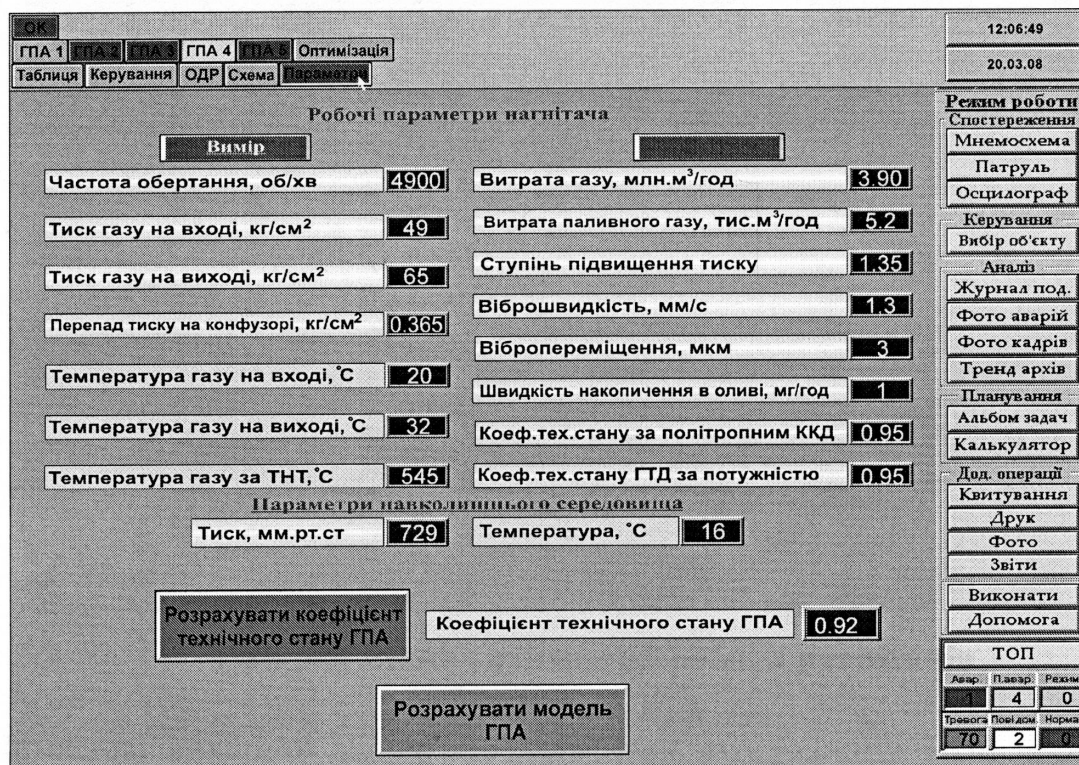


Рис. 5.5. Інтегратор задачі оптимального керування



При натисненні кнопки "Розрахунок" заповнюються текстові поля форми, які відповідають іншим параметрам: продуктивність нагнітача, витрата паливного газу, ступінь підвищення тиску, віброшвидкість, вібропереміщення, швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі, коефіцієнт технічного стані за політропним ККД, коефіцієнт технічного стані ГТД за потужністю. Значення цих параметрів розраховуються з використанням математичного модуля, принцип роботи якого було описано вище.

На основі отриманих вимірян та розрахованих значень параметрів при натисненні на кнопку "Розрахувати коефіцієнт завантаження ГПА" математичний модуль (БЕО, рис. 5.3) розраховує цей коефіцієнт. Розрахунки виконуються в пакеті Fuzzy середовища Matlab.

При натисненні на кнопку "Оптимізація" (рис. 5.5) відкривається вікно оптимізації роботи нагнітачів (рис. 5.6).

**Оптимізація роботи нагнітачів**

12:07:19  
20.03.08

**Загальностанційні параметри**

Тиск газу на вході, кг/см<sup>2</sup> **49**      Продуктивність, млн.м<sup>3</sup>/год **3,90**  
Тиск газу на виході, кг/см<sup>2</sup> **65**      Ступінь підвищення тиску **1,35**  
Температура газу на вході, °C **20**

**Параметри навколишнього середовища**

Тиск, мм.рт.ст **729**      Температура, °C **16**

**Тарифи на енергоресурси**

Вартість газу, грн/тис.м<sup>3</sup> **860**

**Оптимальні затрати на привод, грн/с**

**3.69**

ГПА1	ГПА2	ГПА3	ГПА4	ГПА5
РЕЗЕРВ	РОБОЧИЙ	РОБОЧИЙ	РОБОЧИЙ	НЕ РОБОЧИЙ
Коефіцієнт техн. стану	Коефіцієнт техн. стану	Коефіцієнт техн. стану	Коефіцієнт техн. стану	Коефіцієнт техн. стану
<b>0.907</b>	<b>0.927</b>	<b>0.923</b>	<b>0.919</b>	
Ресурс оптимізації	Ресурс оптимізації	Ресурс оптимізації	Ресурс оптимізації	Ресурс оптимізації
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
Необхідна кількість агрегатів				
	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	
Оптимальна частота обертання				
	<b>4800</b>	<b>5040</b>	<b>4810</b>	

Розрахувати необхідну кількість агрегатів  
Розрахувати оптимальні оберти

Уточнення математичних моделей

**Режим роботи**  
Спостереження  
Мнемосхема  
Патруль  
Осцилограф

**Керування**  
Вибір об'єкту

**Аналіз**  
Журнал под.  
Фото аварій  
Фото кадрів  
Тренд архів

**Планування**  
Альбом задач  
Калькулятор

**Дод. операції**  
Квитування  
Друк  
Фото  
Звіти

**Виконати**  
Допомога

**ТОП**

Авар.	П. авар.	Режим
<b>1</b>	<b>4</b>	<b>0</b>
Тревога	Повідом.	Норма
<b>70</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

**Рис. 5.6. Вікно оптимізації роботи нагнітачів**

На основі вихідних даних, що задаються в головному вікні програми у відповідних текстових полях: "Загальностанційні параметри", "Тарифи на енергоресурси", "Параметри навколишнього середовища" та "Ресурс

оптимізації" (кількість працюючих агрегатів), при виборі "Розрахувати необхідну кількість агрегатів" (елементом управління CommandButton – cmdKrok1) запускається програма пошуку рішення в MS Excel. Вона визначає необхідну кількість агрегатів при заданих умовах роботи. Головні блоки програми приведені нижче:

```
Private Sub cmdKrok1_Click()
    'Присвоєння текстовим полям певних значень комірок із Excel
    Worksheets("Лист1").Range("d19").Value = txtZadoper.Value
    Worksheets("Лист2").Range("b44").Value = txtPvg.Value
    Worksheets("Лист2").Range("b45").Value = txtPvux.Value
    Worksheets("Лист2").Range("b42").Value = txttc.Value
    Worksheets("Лист2").Range("b43").Value = txttvg.Value
    Worksheets("Лист2").Activate
    'Вибір і обрахунок ступеня підвищення тиску газу
    Range("B40").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[5]C/R[4]C"
    Calculate
    txtE.Value = Worksheets("Лист2").Range("b40").Value
    'Присвоєння текстовим полям певних значень комірок із Excel
    Worksheets("Лист1").Activate
    txtRes1.ControlSource = "d10"
    txtRes2.ControlSource = "c10"
    txtRes3.ControlSource = "b10"
    Worksheets("Лист2").Activate
    Worksheets("Лист2").Range("b42").Value= txttc.Value
    Worksheets("Лист1").Activate
    'Формування і виконання процедури пошуку рішення
    SolverOk SetCell:="$A$36", MaxMinVal:=2, ValueOf:="0",_
    Change:="$B$26:$D$26"
    SolverSolve
    'Пересилання масиву даних в MatLAB
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Sheets("Лист2").Select
    Range("B25:D25").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone,
    skipBlanks:= _
    False, Transpose:=False
    'Обрахунок ступеня підвищення тиску газу
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=Лист1!R[-22]C[2]/60"
    Calculate
    Worksheets("Лист1").Activate
End Sub
```

Результатом роботи програми є значення, яке з'являється в текстовому

вікні "Необхідна кількість агрегатів".

Вихідними даними для розв'язку оптимізаційної задачі є такі величини, що задаються у вікні програми у відповідних текстових полях:

- із загально станційних параметрів – вхідний і вихідний тиски в магістральному трубопроводі (в TextBox – txtPvg, txtPvux);
- параметри навколишнього середовища – температура та тиск (в TextBox – txttc, txtpc);
- оптимальна кількість агрегатів (в TextBox – txtN).

Запуск оптимізаційної задачі здійснюється елементом управління CommandBatton – cmdKrok2, *"Розрахувати оптимальну кількість обертів"* натисканням на який запускається програма Optimization в MATLAB. Головні блоки програми приведені нижче:

```
Private Sub cmdKrok2_Click()
'Запускається програма MATLAB
Worksheets("Лист4").Activate
Range("F11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
Calculate
Worksheets("Лист2").Activate
'Масив даних з Excel передається в MATLAB у вигляді матриці
'daniexcel"
Range("A62").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLPutMatrix(""daniexcel""_
,R[-22]C[1]:R[-12]C[1])"
Calculate
'Формування вихідних даних для програми із матриці
'daniexcel"
Range("A63").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString(""E=daniexcel(1)_
,Q_max=daniexcel(2),tc=daniexcel(3),tvg=daniexcel(4),_
Pvg=daniexcel(5),Pvux=daniexcel(6),Cg=daniexcel(7),_
Ce=daniexcel(8),N1=daniexcel(9),N2=daniexcel(10),_
N3=daniexcel(11)"")"
Calculate
'Команда переходу в каталог, де знаходиться програма
оптимізації
Range("A64").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString(""cd c:\T_DP\_
Optim_G"")"
Calculate
'Запуск програми на виконання
Range("A65").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString(""Optum_G1"")"
```

```

Calculate
'Пересилання матриці отриманих результатів "danimatlab" у
вказану комірку Excel
Range("A66").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLGetMatrix(""danimatlab"",_
""B70"")"
Calculate
'Відображення отриманих даних в формі
'закріплення текстовим полям значень певних комірок
Worksheets("Лист2").Activate
txtTg1.ControlSource = "b74"
txtx2.ControlSource = "b72"
txtx3.ControlSource = "b73"
End Sub

```

Після завершення етапу оптимізаційної задачі отримуємо результат, який з'являється в текстових вікнах: "Оптимальна частота обертання" та "Оптимальні затрати на привод".

В процесі експлуатації ГПА та зі зміною пір року програма-інтегратор дозволяє проводити за бажанням персоналу КС адаптацію параметрів математичних моделей ГПА з використанням реальних значень режимних параметрів за відповідні проміжки часу роботи минулого періоду. Елементом управління CommandBatton – cmdKrok3, *"Уточнення математичних моделей"* (рис. 5.6) запускається вікно, зображене на рис. 5.7.

При натисненні клавіші, яка відповідає відповідному номеру нагнітача (наприклад, першому), відкривається вікно перерахунку параметрів математичних моделей (рис. 5.8). Це ж вікно відкриється при натисненні клавіші *"Розрахувати модель ГПА"* (рис. 5.5). Елементом управління CommandBatton – cmdAll, *"Усі нагнітачі"* запускається вікно, аналогічне зображеного на рис. 5.8. При цьому розрахунок параметрів буде проводитись послідовно для усіх нагнітачів. При натисненні кнопки *"Формування бази даних"* (рис. 5.8) пристроєм ПОІ створюється нова база даних для відповідного нагнітача. При цьому можна задавати період (місяць, сезон, рік і т.д.) за даними якого потрібно сформуванати базу.

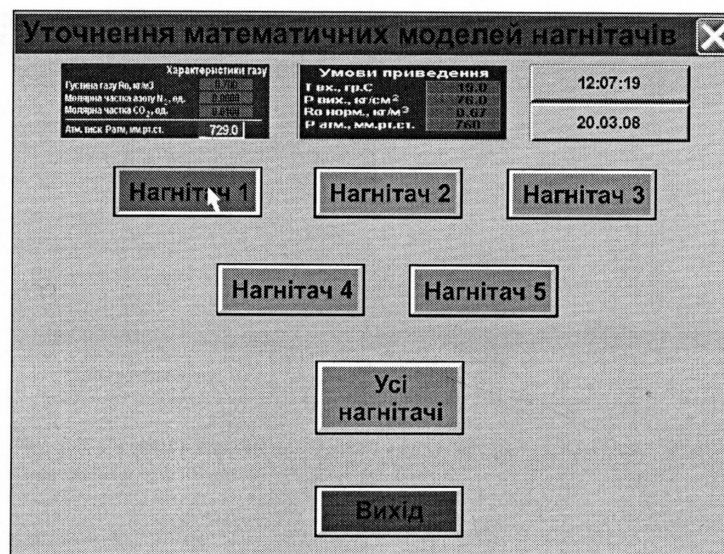


Рис. 5.7. Уточнення математичних моделей нагнітачів

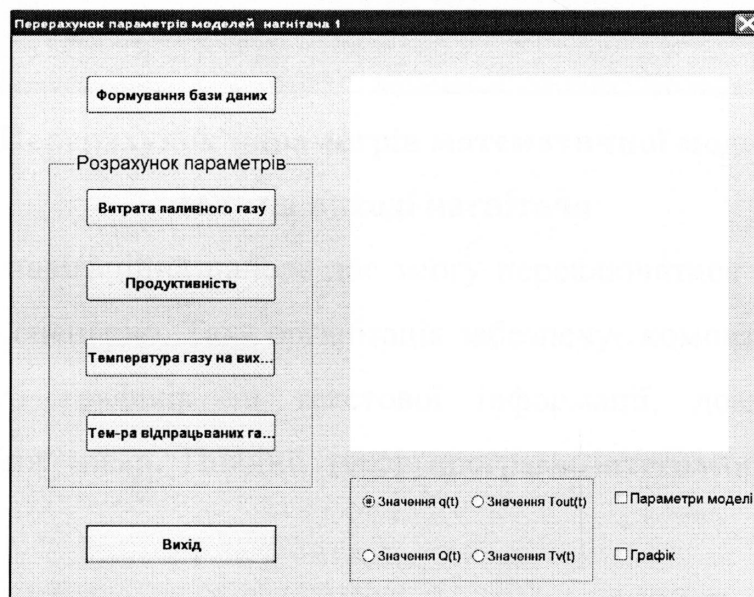


Рис. 5.8. Перерахунок параметрів математичних моделей нагнітачів

Елементами управління CommandBatton – cmdq, "Витрата паливного газу"; CommandBatton – cmdQ, "Продуктивність"; CommandBatton – cmdTout, "Температура газу на виході"; CommandBatton – cmdTv, "Температура відпрацьованих газів" запускаються програми розрахунку відповідних параметрів. Результатом роботи програм є вивід числових значень параметрів моделей та графіки зміни відповідних параметрів (реальні та розраховані) у графічному вікні (рис. 5.9).



**Рис. 5.9. Перерахунок параметрів математичної моделі температури газу на виході нагнітача**

Додаткова навігаційна панель дає змогу переключатися між результатами роботи окремого сценарію. Така організація забезпечує компактне відображення великої кількості графіків та текстової інформації, дозволяючи швидко переключатися між ними. Повний текст програми-інтегратора приведений в додатку Т.

#### **5.4. Результати опробування системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану в умовах Долинського лінійного виробничого управління магістральними газопроводами**

Автоматизована система керування технологічними процесами КЦ №3 КС "Долина" призначена для керування технологічними процесами КЦ у складі інтегрованої системи керування Долинським ЛВУМГ. Локальні САУ побудовані на базі відкритого програмно-логічного контролера "GE Fanuc".

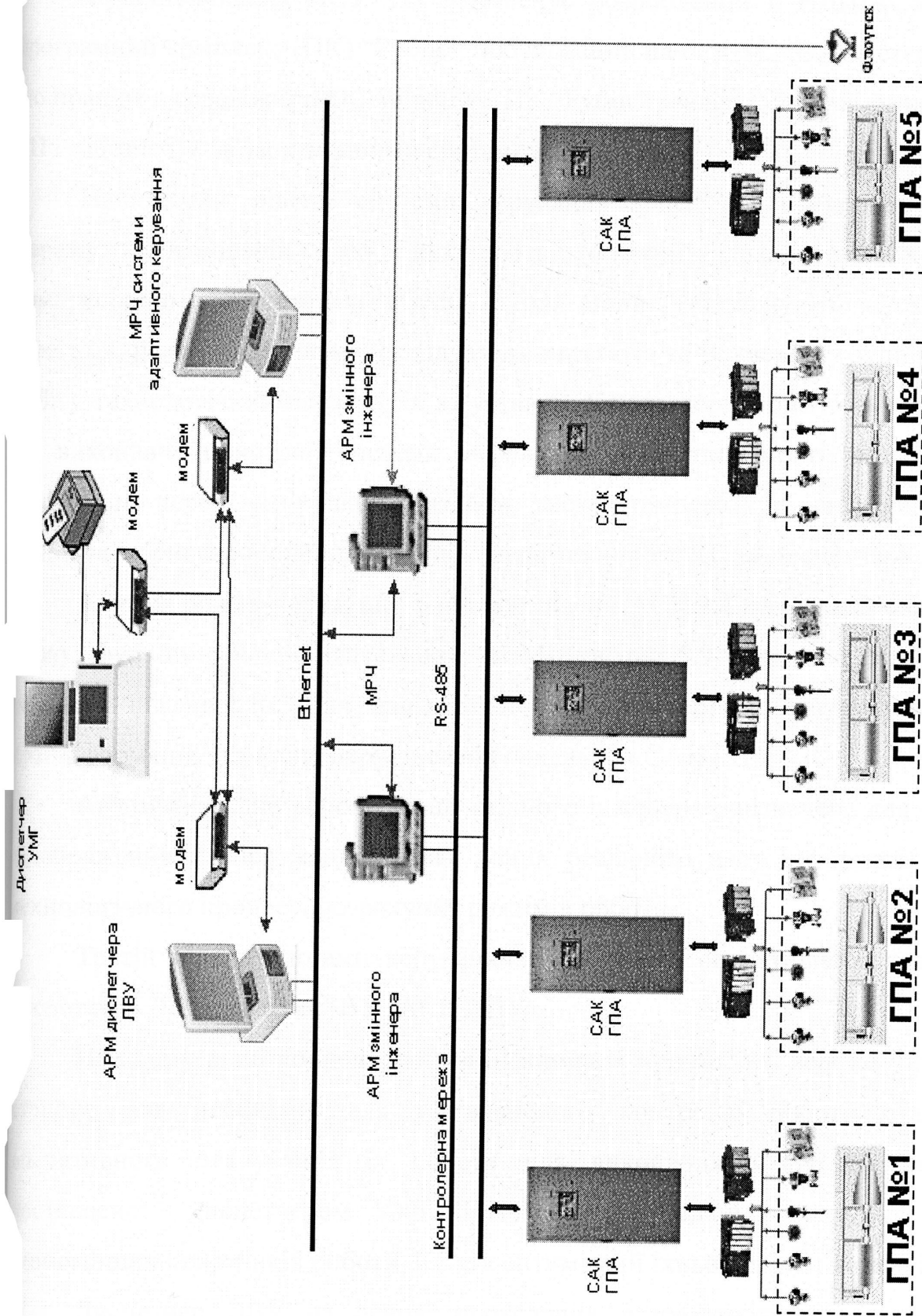


Рис. 5.10. Структура системи оптимального керування роботою ГПА в умовах Долинського ЛВМУГ

Функціонування АСУ ТП забезпечує розроблений в НДПІАСУТрансгаз програмний комплекс (ПК) “Рубін”, побудований на базі SCADA-системи Citect, що працює в середовищі ОС Windows. ПК “Рубін” реалізує основні функції АСУ ТП і забезпечує зв'язок з іншими системами.

Найнижчий рівень системи керування (рис.5.10) представляє собою мережу контролерів, які виконують функції локального керування компресорними агрегатами (САК ГПА). Вони забезпечують пуск/зупинку агрегатів, режим нормальної експлуатації агрегатів та їх аварійну зупинку в разі вибігу технологічних параметрів за уставки. Контролери формують керуючі дії на виконавчі пристрої системи керування у відповідності до одержаної інформації через вимірювальні канали тиску, температури, витрати, вібрації тощо, та коригуючих впливів від інженера-технолога КС та диспетчера ЛВУ.

Другий рівень керування охоплює рівень АСК КС, який включає в себе низку функціонально-орієнтованих АРМ (на рис.5.9 показано тільки АРМ змінного інженера КС) для реалізації оперативного керування агрегатами КС, на базі інформації, яка концентрується від локальних САК ГПА

Автоматизоване робоче місце змінного інженера призначене для обробки, відображення й збереження в базі даних реального часу інформації про хід технологічного процесу, розрахунку режимів роботи.

Третій рівень системи керування – це рівень оперативного планування диспетчера Долинського ЛВУ (АСК ЛВУ).

На цьому рівні концентрується інформація про роботу всіх компресорних станцій, яка необхідна для узагальненого контролю роботи станцій та оперативного планування їх роботи для виконання задачі на перекачку поставленої диспетчером УМГ. Розв'язуються задачі розрахунку техніко-економічних показників роботи КС та оптимізації їхньої роботи на рівні ЛВУ.

Диспетчер ЛВУ на основі проведених розрахунків та з врахуванням завдання від диспетчера УМГ, формує завдання на перекачування газу КС ЛВУ. Крім того, на цьому рівні розгорнуті АРМ допоміжних об'єктів.



Інформація з рівня Долинського ЛВУ передається диспетчеру УМГ «Прикарпаттансгаз» для оперативного-тактичного планування роботи транспортної системи УМГ.

Розроблена комп'ютерна система оптимального керування, алгоритм і програмне забезпечення прийняті до впровадження. Програмні продукти інтегровані у структуру штатної системи керування компресорними станціями і функціонують у режимі «порадника оператора».

При виконанні експериментів здійснена перевірка працездатності системи оптимального керування, яка підтвердила ефективність її використання при вирішенні поставлених у дисертаційній роботі задач. Використання розробленої системи показало ефективність моделей, програм і системи в цілому, що підтверджується актом впровадження від 18.09.2008р.

Для створення автоматизованого робочого місця оператора та для узгодження роботи використано “монітор реального часу” (МРЧ), який складається з двох компонентів: сервер математичної обробки та графічна консоль.

Сервер математичної обробки реалізує функції обробки даних, визначення реальних показників технічного стану ГПА, знаходження оптимального розподілу навантаження між нагнітачами, управління.

Крім цього він реалізує функції обміну з базами даних та іншим програмним забезпеченням, здійснює архівування і зчитування даних з архівів. Графічна консоль реалізує функції людино-машинного інтерфейсу. Цей модуль запрошує дані у сервера математичної обробки для їх відображення і передає зворотні команди управління, які сформовані оператором. Розроблене програмне забезпечення системи включає в себе підпрограми формування бази даних, ідентифікації параметрів математичних моделей, обчислення керувальних впливів. Розроблений варіант системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану працював в режимі порадника.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Запропонована система оптимального керування процесом компримування природного газу та здійснено її технічну реалізацію за допомогою системи приладів, інтерфейсу вводу-виводу та персональної ЕОМ, яка дає можливість знаходити оптимальні значення навантаження нагнітачів на основі їх реального технічного стану.

2. Запропонована структура комп'ютерної системи, яка забезпечує поетапний розв'язок задачі оптимального керування процесом компримування і яка інтегрована в існуючу систему керування процесом.

3. Розроблений прикладний програмний продукт підтримки задачі оптимального керування в АСК процесу компримування, який забезпечує інтегрування розв'язку задач оптимального керування за єдиним сценарієм з можливістю інтегрування його в існуюче програмне забезпечення.

4. Система оптимального керування та програмне забезпечення були впробовані на Долинському ЛВУМГ. Очікування економічної ефективності становить близько 4 млн. гривень за рік в цінах 2008 року.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведене теоретичне узагальнення і вирішення актуальної науково-технічної задачі, яка полягає в розробці методу оптимізації розподілу навантаження між паралельно працюючими агрегатами із врахуванням їх технічного стану, і, на цій основі, синтезу комп'ютерної системи оптимального керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з врахуванням їх технічного стану. Вирішення цієї задачі дозволяє зменшити витрати енергоресурсів на транспортування природного газу магістральними газопроводами України.

1. Аналіз стану задачі виявив відсутність загальноприйнятого методу оптимального керування процесом компримування природного газу. Відомі методи оптимізації роботи газотранспортних мереж практично не враховують реальний технічний стан елементів газоперекачувального обладнання. Проте багаторічний досвід експлуатації ГТС показує, що оптимальне керування роботою КС не можливе без діагностики ГПА. Ця задача на сьогоднішній день є актуальною і потребує подальшого вирішення на основі природного критерію мінімуму енергетичних витрат на компримування природного газу.

2. Розроблено методику ранжирування газоперекачувальних агрегатів за їх технічним станом на основі нечіткої логіки. Дана методика дає змогу розрахувати коефіцієнт завантаження нагнітачів виходячи з їх реального технічного стану за такими діагностичними показниками, як: швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі, коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропічним к.к.д., коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю, віброшвидкість та вібропереміщення. Отримані коефіцієнти завантаження дали змогу врахувати технічний стан ГПА у формалізованій постановці задачі оптимізації процесу компримування природного газу.

3. Отримані емпіричні моделі процесу компримування природного газу за допомогою методу групового врахування аргументів, який заснований на принципі самоорганізації і мінімального обсягу апріорної інформації про об'єкт, дали змогу побудувати адекватні процесу компримування природного

газу математичні моделі. Коефіцієнт кореляції між експериментальними та розрахованими значеннями, за різними моделями, приймає значення в межах від 0.985 до 0.997, що свідчить про адекватність побудованих моделей.

4. Формалізована задача оптимального керування газоперекачувальними агрегатами, яка полягає в оптимальному розподілі потоків газу між паралельно працюючими агрегатами з врахуванням їх технічного стану, в структуру якої входить критерій оптимальності та обмеження на керуючі дії. Розв'язок задачі дав змогу раціонально використати потенційні можливості кожного із агрегатів та зменшити споживання паливного газу.

5. Розроблений метод оптимального керування роботою КС із урахуванням узагальнених коефіцієнтів технічного стану ГПА та параметрів навколишнього середовища дає змогу визначити необхідну кількість агрегатів та оптимальну частоту обертання ротора кожного із нагнітачів, при яких забезпечується задана продуктивність станції та зменшується споживання паливного газу. Зменшення витрат на компримування газу складає близько 0,19 гривень на 1000 ст.м<sup>3</sup> транспортованого газу.

6. Синтезована система оптимального керування та розроблене її програмне забезпечення на основі алгоритмів ранжирування нагнітачів за їх технічним станом та алгоритмів оптимального керування роботою ГПА. Система апробована в умовах Долинського ЛВУМГ і очікуваний економічний ефект становить близько 4 млн. гривень за рік в цінах 2008 року.

7. Алгоритмічне та програмне забезпечення комп'ютерної системи оптимального керування ГПА з врахуванням їх технічного стану впроваджені в навчальний процес кафедри комп'ютерних систем та мереж в наступних дисциплінах: "Промислові мережі" для студентів спеціальності 6.092501 – Автоматизоване управління технологічними процесами; Спеціалізовані комп'ютерні системи" для студентів спеціальності 6.091501 – Комп'ютерні системи та мережі.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

головний інженер

УМГ "Прикарпаттрансгаз"

2008 р



## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія, в складі представника управління магістральних газопроводів "Прикарпаттрансгаз": начальника виробничого відділу автоматизації виробництва "Прикарпаттрансгаз" КУЧМІЯ Євгена Антоновича та представників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу: завідувача кафедри комп'ютерних систем і мереж (КСМ), д.т.н., професора ГОРБІЙЧУКА Михайла Івановича, пошукувача кафедри КСМ ЗАЯЧУКА Ярослава Івановича склали цей акт в тому, що «18» вересня 2008р. прийняті до впровадження наступні результати дисертаційної роботи Заячука Я.І.: програмне забезпечення адаптивної системи управління роботою відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів. Програмні продукти інтегровані у структуру штатної системи керування компресорними станціями і функціонують у режимі "порадника оператора". Очікуваний економічний ефект від впровадження складе 3 млн. 790 тис. грн за рік в цінах 2008 року.

від УМГ "Прикарпаттрансгаз"

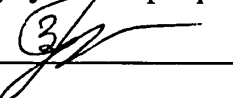
Начальник ВВ АВ

 / Кучмій Є. А./

Від Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
завідувач кафедри КСМ, д-р техн. наук, проф.

 / Горбійчук М. І. /

пошукувач кафедри КСМ

 / Заячук Я.І./

## ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Івано-Франківського  
національного технічного  
університету нафти і газу  
Д. І. Крижанівський  
професор  
10 2008р.

### Акт

Про використання в навчальному процесі наукових результатів дисертаційної роботи Я. І. Заячука "Адаптивне управління процесом компримування природного газу", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – "Автоматизація процесів керування".

Ми, що нижче підписалися, склали даний акт в тому, що алгоритмічне і програмне забезпечення комп'ютерної системи адаптивного управління процесом компримування природного газу впроваджені в навчальний процес кафедри комп'ютерних систем та мереж в наступних дисциплінах: "Промислові мережі" для студентів спеціальності 6.092501 – Автоматизоване управління технологічними процесами; "Спеціалізовані комп'ютерні системи" для студентів спеціальності 6.091501 – Комп'ютерні системи та мережі.

### Розділи робочої програми і використання наукових результатів дисертаційної роботи Я. І. Заячука

Дисципліна - Промислові мережі

Шифр спеціальності - 6.092501 – Автоматизоване управління технологічними процесами.

№	Тема лекції	Впровадження в навчальний процес	Обсяг годин	Додаткова література
1	Програмне забезпечення промислових мереж. Операційні системи для ПМ, системи SCADA.	Розроблене програмне забезпечення системи адаптивного управління процесом компримування природного газу.	1	[1]

Дисципліна - Спеціалізовані комп'ютерні системи.

Шифр спеціальності - 6.091501 – Комп'ютерні системи та мережі.

№	Тема лекції	Впровадження в навчальний процес	Обсяг годин	Додаткова література
1	Спеціалізовані комп'ютерні системи для об'єктів нафтогазового комплексу	Розроблену комп'ютерну систему адаптивного управління процесом компримування природного газу.	1	[2,3]

Додаткова література

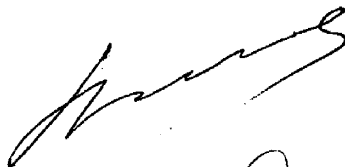
1. Горбійчук М. І. Адаптивне керування процесом компримування газу / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук // Збірник наукових праць Всеукраїнської наукової конференції "Мікропроцесорні пристрої та системи в автоматизації виробничих процесів". – Хмельницький, 2004. – С. 13 – 18.
2. Горбійчук М. І. Оптимальне керування роботою палітативів природного газу із врахуванням технічного стану ГПА / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – №4/3 (34). – С. 22 – 24.
3. Заячук Я. І. Адаптивне управління процесом компримування природного газу з врахуванням технічного стану ГПА / Я. І. Заячук // Автоматика-2008: 15 Міжнародна конференція по автоматичному управлінню. Одеса, 23-26 вересня 2008 р. – Одеса, 2008. – С. 786 – 789.

Проректор з науково-педагогічної роботи  
д.фіз.-мат.н., професор



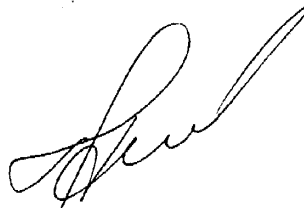
М. О. Галушак

Декан факультету автоматизації  
та комп'ютерних наук, д.т.н., проф.



В. М. Юрчишин

Завідувач кафедри автоматизації  
технологічних процесів і  
моніторингу в екології,  
д.т.н., проф.



Г. Н. Семенцов

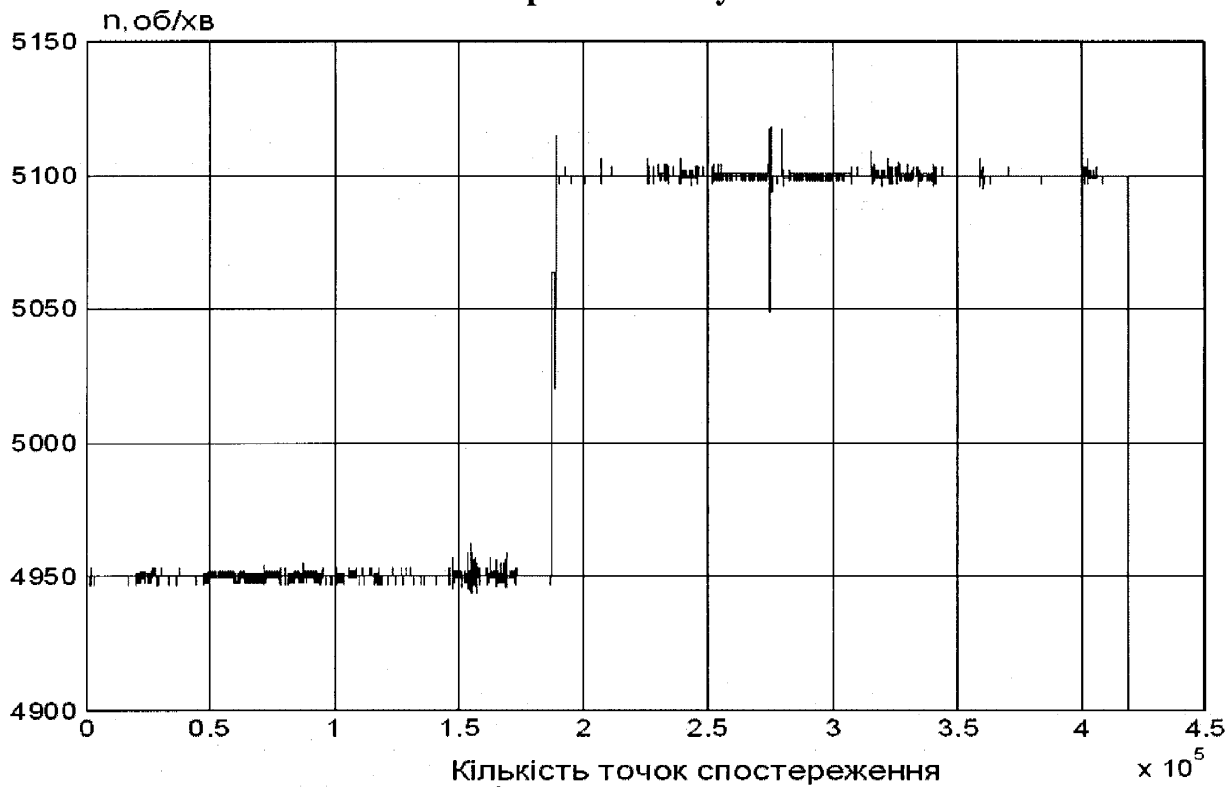
Завідувач кафедри комп'ютерних  
систем та мереж, д.т.н., проф.



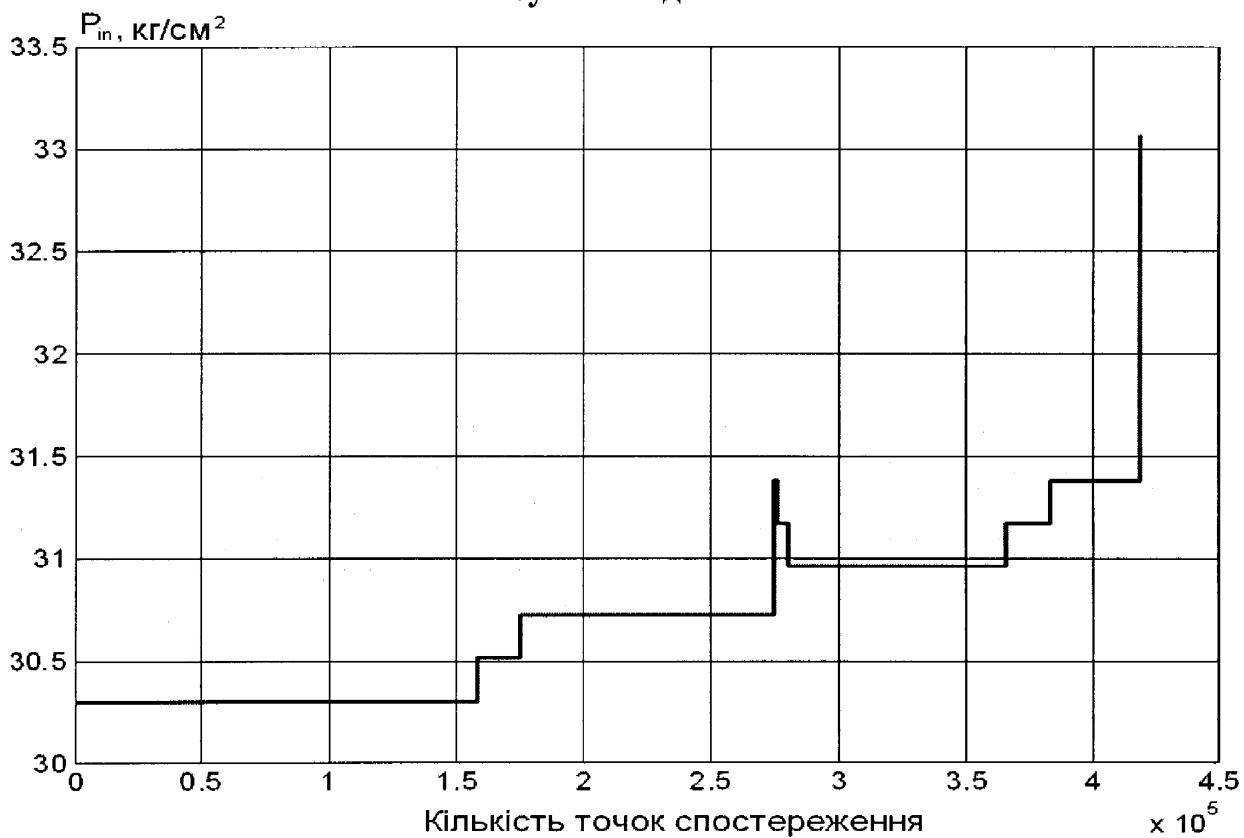
М. І. Горбійчук

Додаток А  
Зміна технологічних параметрів ГПА №2 КС-3 "Долина" з 29-04-2006  
07:27:44 по 4-05-2006 03:56:32.

Частота обертання валу нагнітача



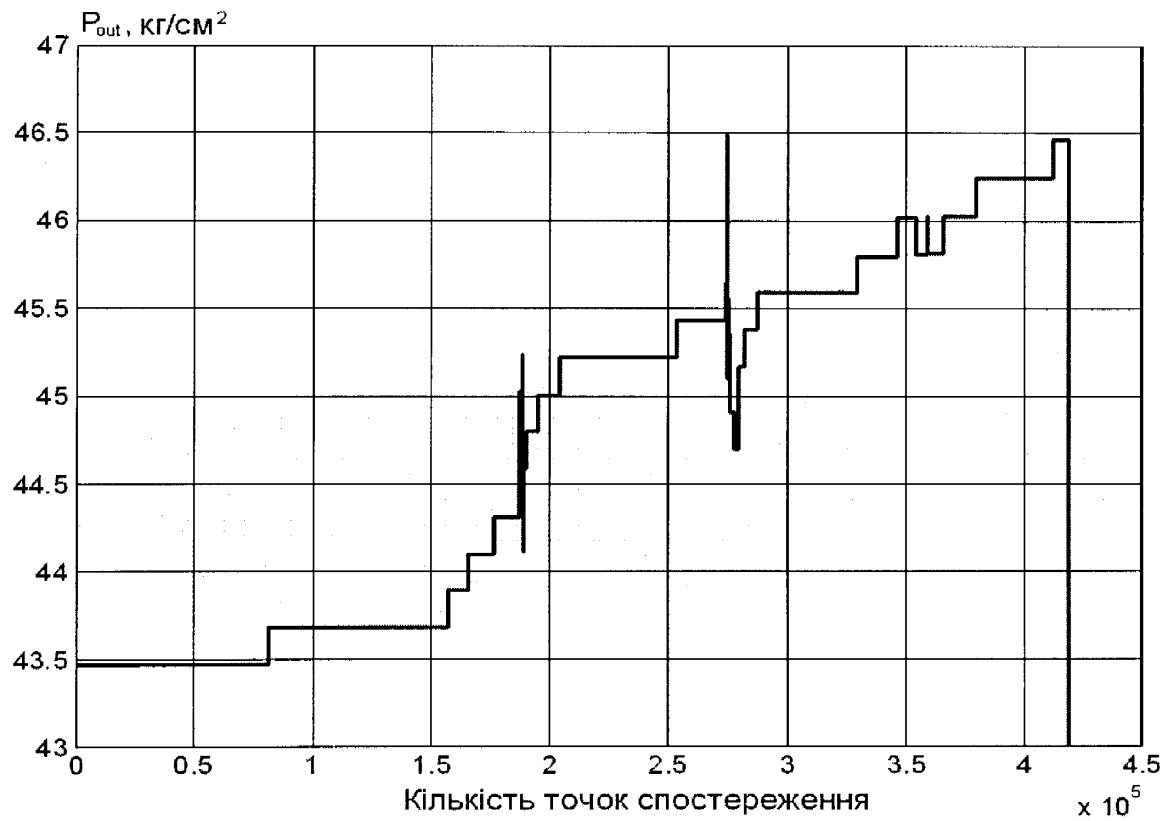
Тиск газу на вході нагнітача



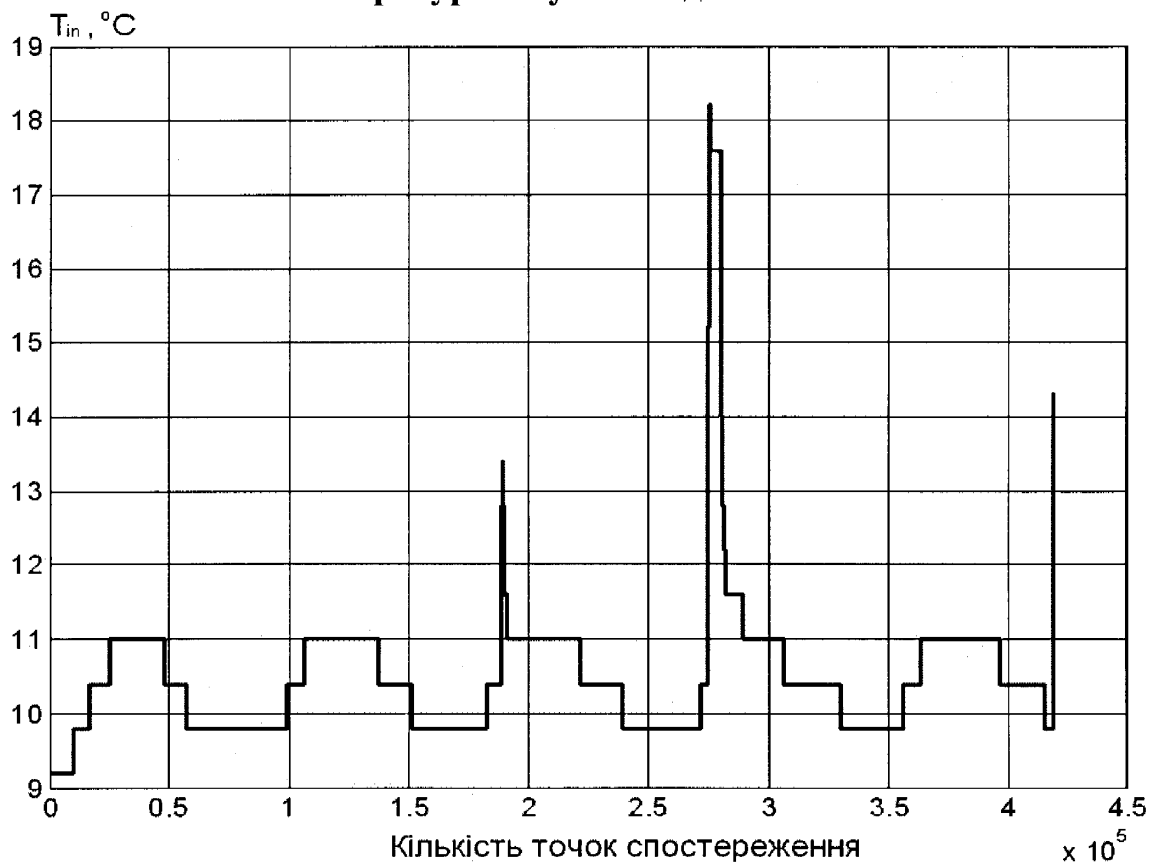


## Додаток А (продовження)

## Тиск газу на виході нагнітача

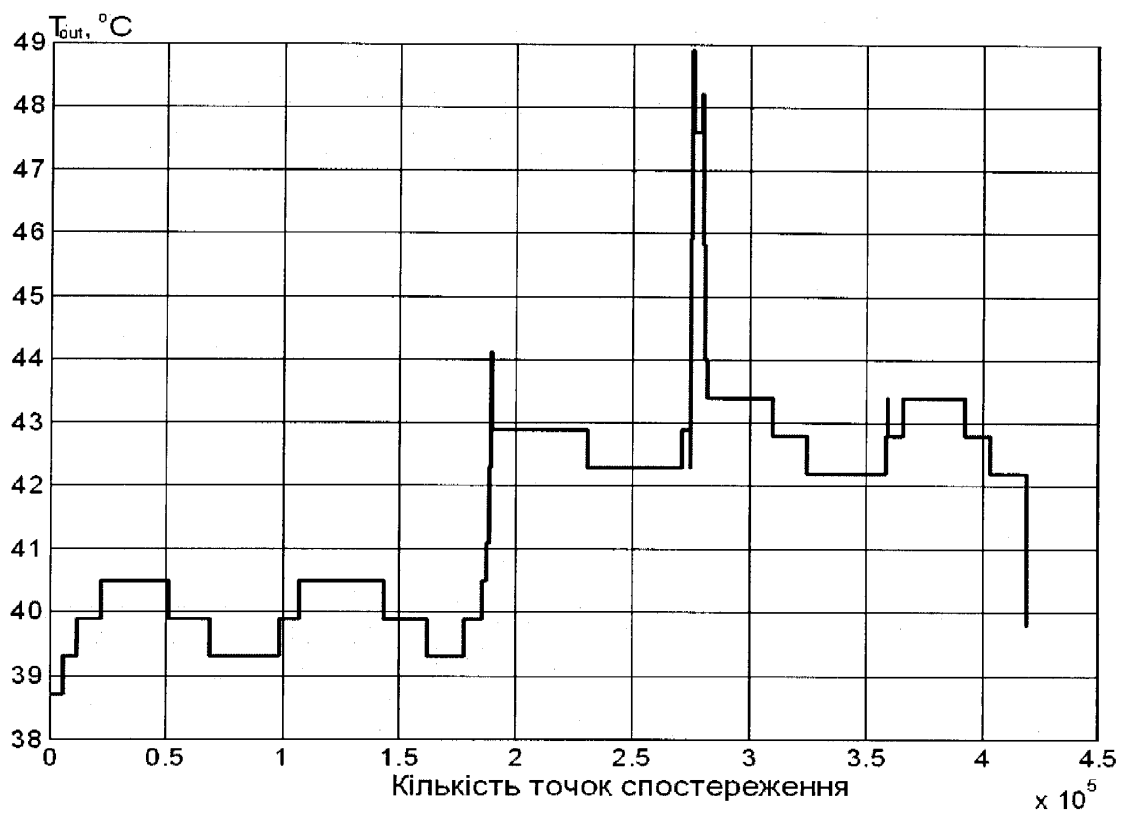


## Температура газу на вході нагнітача

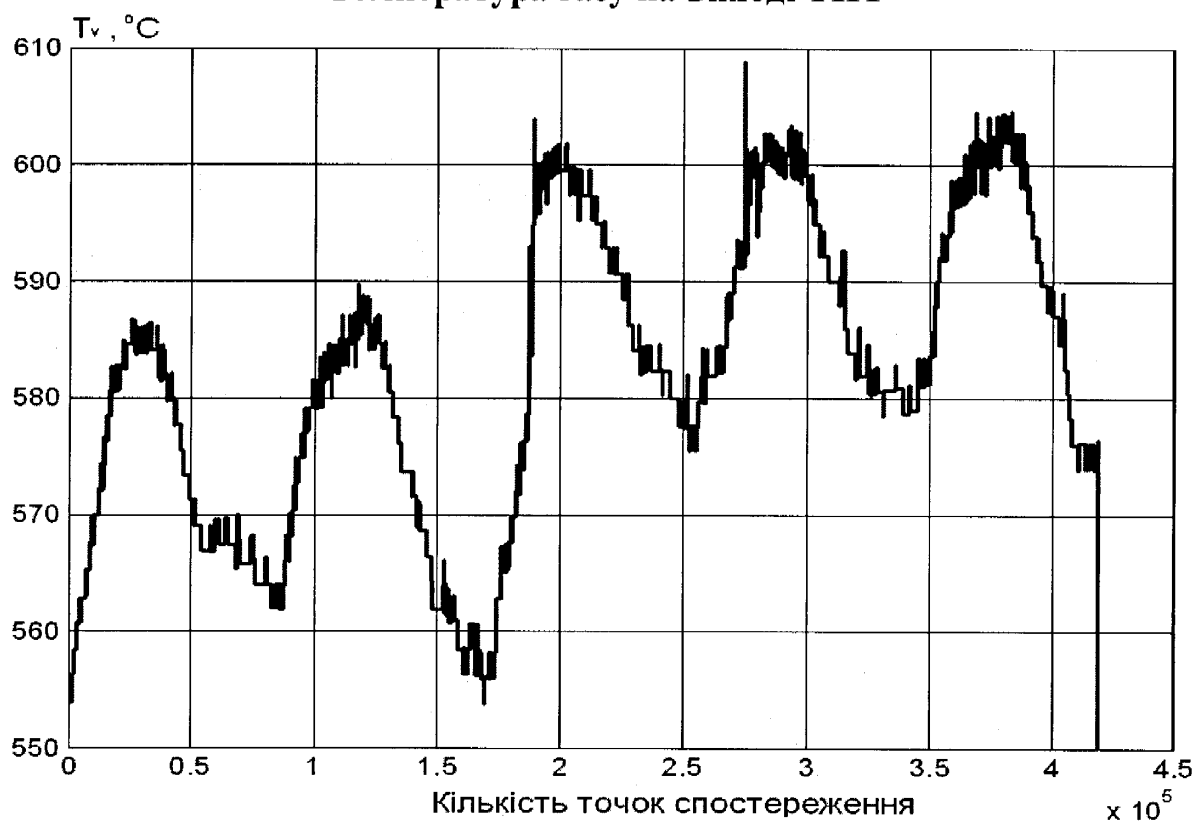


## Додаток А (продовження)

## Температура газу на виході нагнітача



## Температура газу на виході ТНТ



## Додаток Б

### Б.1 Аналіз зміни густини природного газу

#### Позначення

t - час, дні

r - густина газу, кг/куб. м.

D - відносна густина газу за повітрям

#### Виявлення тренду в експериментальних даних

$$t := g \langle 0 \rangle \quad \rho := g \langle 1 \rangle \quad \Delta := g \langle 2 \rangle$$

*Обчислення коефіцієнтів рівняння регресії*

z := rows(g) Кількість замірів густини газу

i := 0..z-1

$F_{i,0} := 1$      $F_{i,1} := t_i$     Формування матриці F

$M := F^T \cdot F$     Матриця Фішера

$C := M^{-1}$     Дисперсійна матриця

$a := C \cdot F^T \cdot \rho$     Обчислення параметрів моделі     $\rho = a_0 + a_1 \cdot t$

$$a = \begin{pmatrix} 0.679 \\ 5.701 \times 10^{-6} \end{pmatrix} \text{ Параметри моделі}$$

$a_1 = 5.701 \times 10^{-6}$     Коефіцієнт нахилу прямої  $y=f(x)$  до вісі абсцис

$y_p := F \cdot a$     Розрахункові значення густини газу

*Перевірка гіпотези про нульове значення коефіцієнта  $a_1$*

df := z - 2

$\alpha := 0.05$     Рівень довіри

$$s_1 := \sqrt{\frac{1}{z-2} \cdot \sum_{j=0}^{z-1} (\rho_j - y_{pj})^2}$$

Середньоквадратичне відхилення експериментальних даних від розрахункових для густини газу

$$s_1 = 6.647 \times 10^{-4}$$

$s_{a_1} := (C_{1,1})^{0.5} \cdot s_1$     Середньоквадратична відхилення для коефіцієнта  $a_1$

## Додаток Б (продовження)

$$s_{a1} = 1.582 \times 10^{-6}$$

$H_0: \mu = \mu_0$  Гіпотеза  $H_0$  - математичне сподівання коефіцієнта  $a_1$  дорівнює нулю

$H_1: \mu \neq \mu_0$  Альтернативна гіпотеза  $H_1$  - математичне сподівання коефіцієнта  $a_1$  не дорівнює нулю

$\mu_0 := 0$  Задаємо нульове значення математичного сподівання коефіцієнта  $a_1$

$$t_t := \frac{(a_1 - \mu_0)}{s_{a1}} \quad t_t = 3.602 \quad \text{Нова нормована випадкова величина}$$

$$tf := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, df\right) \quad \text{Обчислення інтервалу, в який з ймовірністю } P=1-\alpha \text{ попаде коефіцієнт } a_1$$

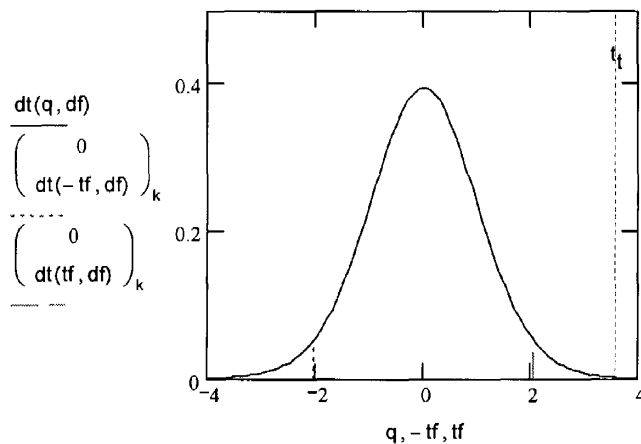
$$tf = 2.06$$

$|a_1| < tf \cdot s_{a1} = 0$  **Умова виконання гіпотези  $H_0$** : якщо логічна умова "єдиниця", то гіпотеза  $H_0$  приймається

*Графічна інтерпретація  $H_0$ -гіпотези*

$$q := -4, -3.9..4$$

$$k := 0..1$$



### Обчислення довірливих інтервалів

*Довірливий інтервал для лінії регресії  $f(t)$*

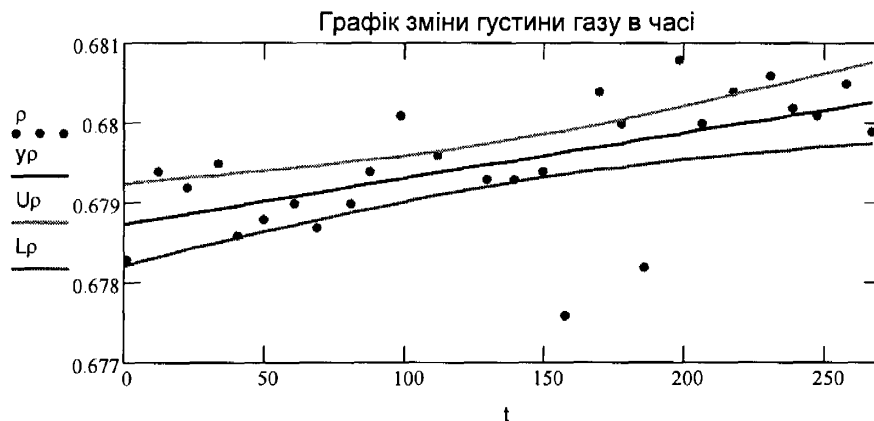
$$t_c := \frac{1}{z} \cdot \sum_{j=0}^{z-1} t_j \quad \text{Середнє значення для величини } t$$

## Додаток Б (продовження)

$$s_i := s^2 \cdot \left[ \frac{1}{z} + \frac{(t_i - t_c)^2}{z-1} \right] \quad \text{Дисперсія для лінії регресії}$$

$$U_{\rho_i} := y_{\rho_i} + t_f \cdot \sqrt{s_i} \quad \text{Верхня межа довірливого інтервалу}$$

$$L_{\rho_i} := y_{\rho_i} - t_f \cdot \sqrt{s_i} \quad \text{Нижня межа довірливого інтервалу}$$



Довірливий інтервал для оцінки математичного очікування випадкової величини  $\rho$

$$m := \text{mean}(\rho) \quad m = 0.679 \quad \text{Оцінка математичного очікування випадкової величини}$$

$$s := \text{stdev}(\rho) \cdot \sqrt{\frac{z}{z-1}} \quad s = 8.033 \times 10^{-4} \quad \text{Оцінка дисперсії випадкової величини}$$

$$(L \ U) := \left( m - \left| \text{qt}\left(\frac{\alpha}{2}, z-1\right) \right| \cdot \frac{s}{\sqrt{z}} \quad m + \left| \text{qt}\left(\frac{\alpha}{2}, z-1\right) \right| \cdot \frac{s}{\sqrt{z}} \right) \quad \text{Довірливий інтервал для } m$$

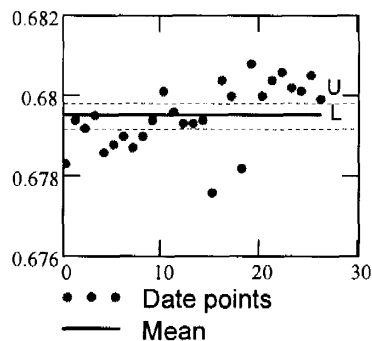
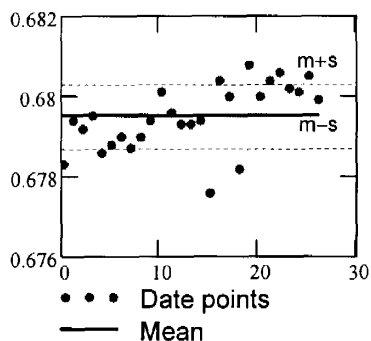
$$U = 0.68 \quad \text{Верхня межа довірливого інтервалу}$$

$$L = 0.679 \quad \text{Нижня межа довірливого інтервалу}$$

$$\frac{U-L}{m} \cdot 100 = 0.094 \quad \text{Відносна ширина довірливого інтервалу, \%}$$

Графічна інтерпретація результатів обчислень оцінки математичного очікування випадкової величини  $\rho$

$$i := 0..z-1$$



## Додаток Б (продовження)

## Б.2 Аналіз формул для обчислення коефіцієнта стисливості газу

Формула для обчислення коефіцієнта стисливості газу у відповідності з РД 50-213-80

$$\begin{aligned}
 Z(P_{nsi}, T, \rho, X_y, X_a) := & \left\{ \begin{aligned}
 P & \leftarrow 10.1972(P_{nsi} + 0.101325) \\
 P_{nk} & \leftarrow 30.168 \left[ 0.05993(26.831 - \rho) + (X_y - 0.392 X_a) \cdot 10^{-2} \right] \\
 T_{nk} & \leftarrow 88.25 \left[ 1.7591(0.56364 + \rho) - (X_y + 1.68 X_a) \cdot 10^{-2} \right] \\
 P_{np} & \leftarrow \frac{P}{P_{nk}} \\
 T_{np} & \leftarrow \frac{T}{T_{nk}} \\
 P_c & \leftarrow 0.6714 P_{np} \\
 T_c & \leftarrow 0.71892 T_{np} \\
 & \left( \frac{1.61353}{T_c^2} - 2.21323 \right) + 3.30378 \\
 Q_1 & \leftarrow \frac{\quad}{T_c} \\
 & \left( \frac{4.57697}{T_c^2} + 26.5827 \right) - 13.3185 \\
 Q_2 & \leftarrow \frac{\quad}{T_c \cdot Q_1} \\
 B_1 & \leftarrow \frac{(300 - Q_1 \cdot Q_2^2)}{9 \cdot Q_1} \\
 tc & \leftarrow 1.09 - T_c \\
 tc1 & \leftarrow -1.09 + T_c \\
 pc & \leftarrow 1.69 - P_c^2 \\
 F_1 & \leftarrow 1 - 75 \cdot 10^{-5} \cdot P_c \cdot [P_c^{1.3} \cdot (2 - \exp(-20 \cdot tc)) + 1756 tc^4 \cdot pc] \\
 F_2 & \leftarrow 1 - 10^{-3} \cdot P_c^2 \cdot [0.75 P_c^{0.3} \cdot \exp(-20 \cdot tc1) + 1.1 \cdot tc1^{0.5} \cdot (2.17 + 1.4 tc1^{0.5} - P_c)^2] \\
 B_0 & \leftarrow \left\{ \begin{aligned}
 & \left[ \frac{(450 - Q_1 \cdot Q_2^2)}{27} \cdot Q_2 - 50 \cdot P_c \cdot F_1 \right] & \text{if } \left\{ \begin{aligned}
 & 0.0147 \leq P_c \leq 1.3 \\
 & 0.84 \leq T_c < 1.09
 \end{aligned} \right. \\
 & \left[ \frac{(450 - Q_1 \cdot Q_2^2)}{27} \cdot Q_2 - 50 \cdot P_c \cdot F_2 \right] & \text{if } \left\{ \begin{aligned}
 & 0.0147 \leq P_c \leq 2 \\
 & 1.09 \leq T_c \leq 1.4
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right. \\
 B_2 & \leftarrow \left[ (B_0^2 + B_1^3)^{0.5} + B_0 \right]^{\frac{1}{3}} \\
 & \left( 1 + \frac{1.32 \cdot 10^{-3}}{T_c^{3.25}} \right)^2 \cdot \frac{P_c}{\frac{B_1}{B_2} - B_2 + \frac{Q_2}{3}}
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

### Додаток Б (продовження)

$$Z1(p, t, \Delta) := \begin{cases} (-0.457 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta + 0.626 \cdot 10^{-3}) \cdot (p - 6) + 0.982 & \text{if } t < 25 \\ (-0.345 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta + 0.446 \cdot 10^{-3}) \cdot (p - 6) + 0.985 & \text{if } 25 \leq t < 50 \\ (-0.125 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta + 0.461 \cdot 10^{-3}) \cdot (p - 6) + 0.992 & \text{if } t \geq 50 \end{cases}$$

Формула для обчислення коефіцієнта стисливості, яка взята із [10, 13]

$$Z2(p, t, \Delta) := 1 - [(p - 6) \cdot (0.345 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta - 0.446 \cdot 10^{-3}) + 0.015] \cdot [1.3 - 0.0144(t - 10)]$$

Формула для обчислення коефіцієнта стисливості, яка взята із [10, 13]

**Вихідні дані для обчислень**

t := 50 Температура повітря, С

p := 0.6793 Густина газу за повітрям

Δ := 0.564 Відносна густина газу за повітрям

Xa :=  $8.26 \cdot 10^{-3}$  Концентрація азоту в газовій суміші

Xy :=  $3.317 \cdot 10^{-4}$  Концентрація вуглекислого газу в газовій суміші

p0 := 20 Початкове значення тиску

pk := 60 Кінцеве значення тиску

N := 25 Кількість точок обчислень

st :=  $\frac{pk - p0}{N}$  Крок обчислень

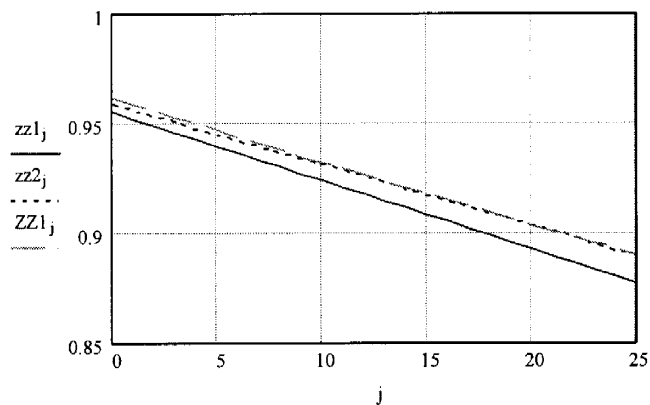
j := 0.. N

pzj := p0 + st · j    pxj := 0.101 · (p0 + st · j)

**Обчислення коефіцієнта стисливості при t=20**

t := 20

zz1j := Z1(pzj, t, Δ)    zz2j := Z2(pzj, t, Δ)    ZZ1j := Z(pxj, t + 273.15, ρ, Xy, Xa)



*Похибки обчислень*

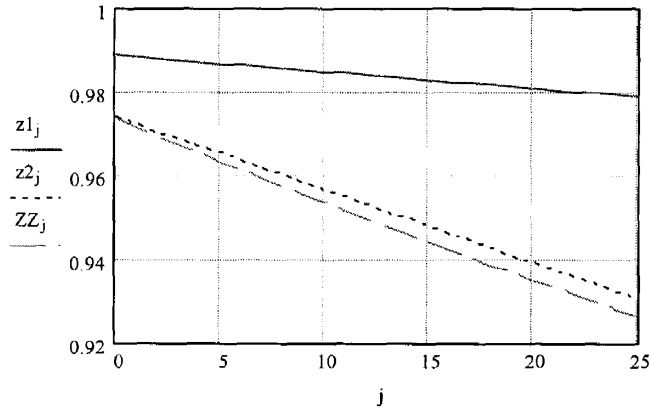
$$\delta := \frac{|\max(zz1 - ZZ1)|}{ZZ1_{25}} \cdot 100 \quad \delta = 0.772 \quad \delta_1 := \frac{|\max(zz2 - ZZ1)|}{ZZ1_{25}} \cdot 100 \quad \delta_1 = 0.057$$

### Додаток Б (продовження)

#### Обчислення коефіцієнта стисливості при t=50

$$t := 50$$

$$z1_j := Z1(pz_j, t, \Delta) \quad z2_j := Z2(pz_j, t, \Delta) \quad ZZ_j := Z(px_j, t + 273.15, \rho, Xy, Xa)$$



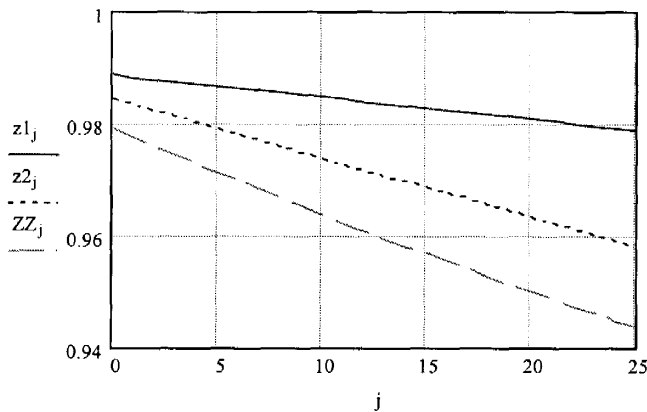
Похибки обчислень

$$\delta := \frac{|\max(z1 - ZZ)|}{ZZ_{25}} \cdot 100 \quad \delta = 5.658 \quad \delta_1 := \frac{|\max(z2 - ZZ)|}{ZZ_{25}} \cdot 100 \quad \delta_1 = 0.454$$

#### Обчислення коефіцієнта стисливості при t=70

$$t := 70$$

$$z1_j := Z1(pz_j, t, \Delta) \quad z2_j := Z2(pz_j, t, \Delta) \quad ZZ_j := Z(px_j, t + 273.15, \rho, Xy, Xa)$$



Похибки обчислень

$$\delta := \frac{|\max(z1 - ZZ)|}{ZZ_{25}} \cdot 100 \quad \delta = 3.718$$

$$\delta_1 := \frac{|\max(z2 - ZZ)|}{ZZ_{25}} \cdot 100 \quad \delta_1 = 1.527$$



## Додаток В

## Результати опитування експертів

		швидкість накопичення продуктів спрацювання в моторній оливі						
	терм	[0,0.15)	[0.15,0.3)	[0.3,0.45)	[0.45,0.6)	[0.6,0.75)	[0.75,0.9)	[0.9,1)
Експерт 1	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 2	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	0	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 3	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 4	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 5	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	0	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
		коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним ККД						
	терм	[0.7,0.74)	[0.74,0.78)	[0.78,0.82)	[0.82,0.86)	[0.86,0.9)	[0.9,0.95)	[0.95,1)
Експерт 1	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	1	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 2	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 3	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 4	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	0	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 5	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1

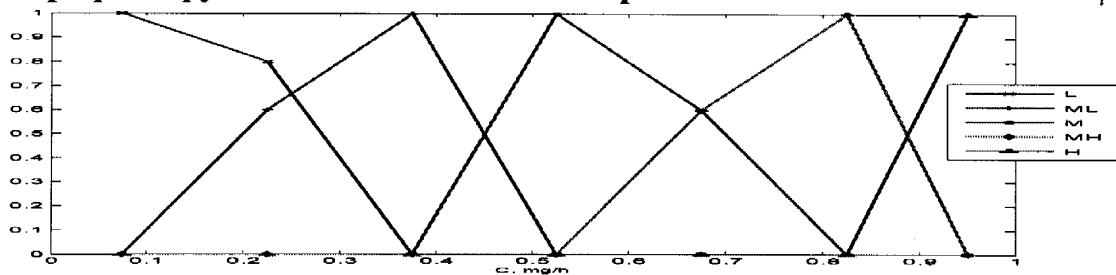
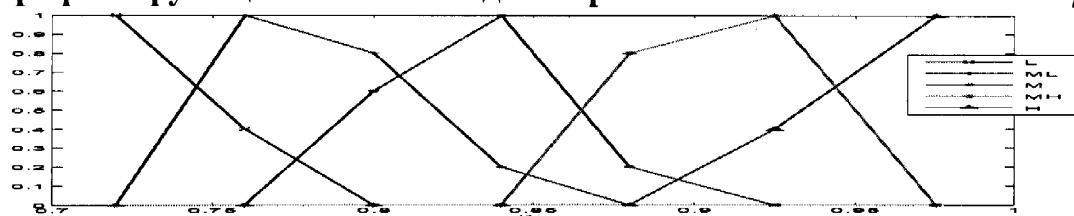
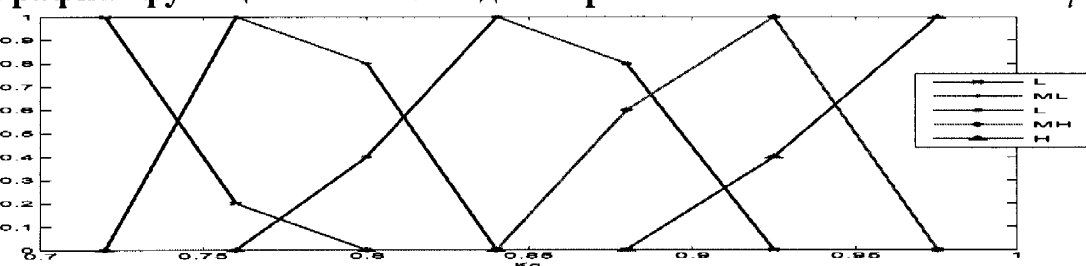
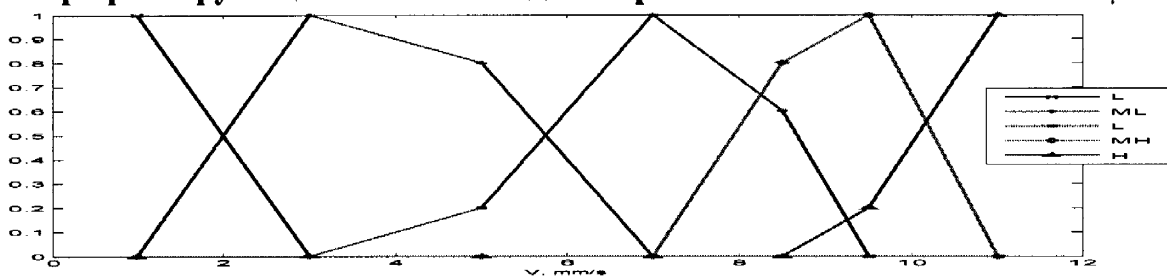
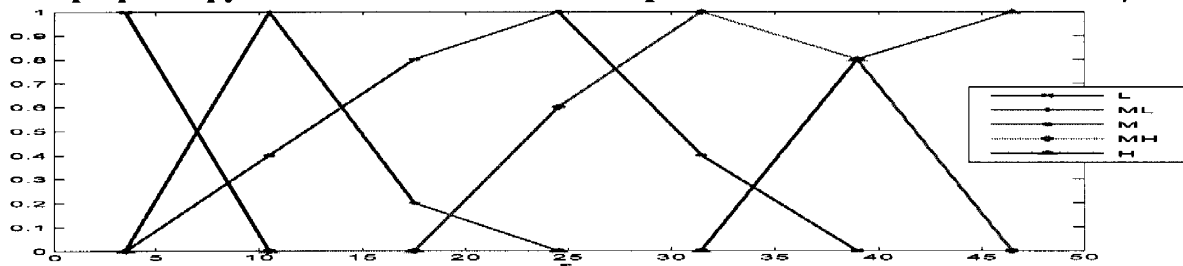
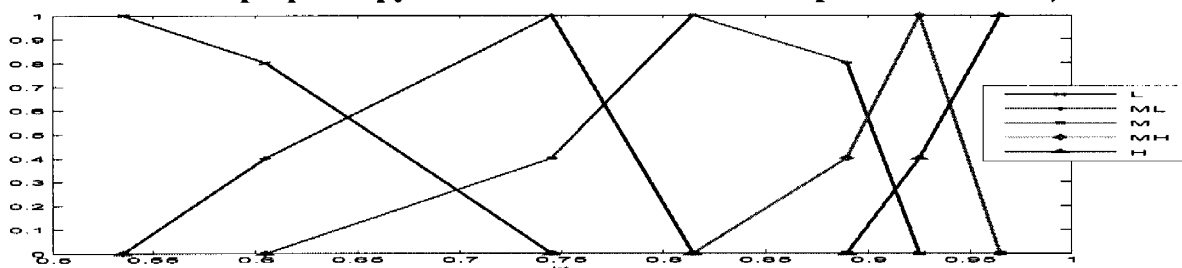
## Додаток В (продовження)

		коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю						
	терм	[0,7,0,74)	[0,74,0,78)	[0,78,0,82)	[0,82,0,86)	[0,86,0,9)	[0,9,0,95)	[0,95,1)
Експерт 1	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 2	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	0	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 3	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 4	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 5	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
		віброшвидкість						
	терм	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,9)	[9,10)	[10,12)
Експерт 1	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 2	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 3	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	0	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 4	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	1	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 5	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1

## Додаток В (продовження)

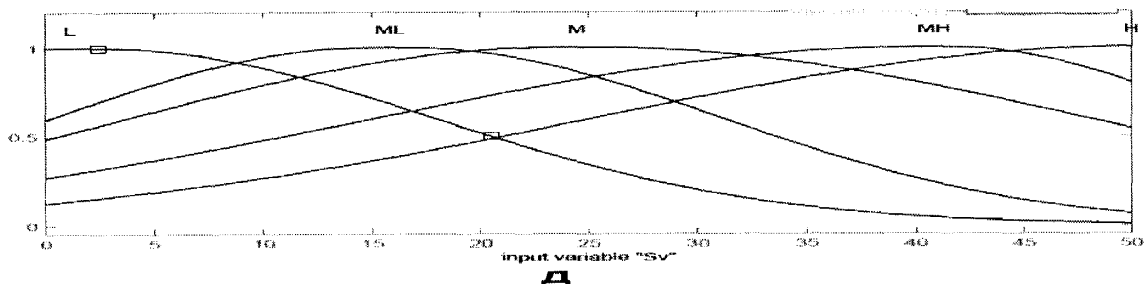
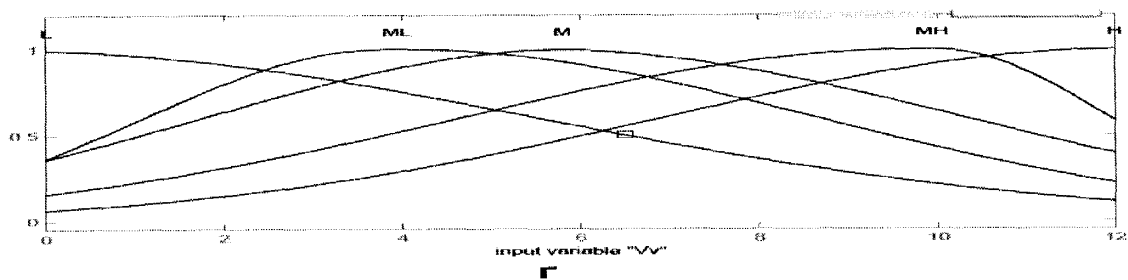
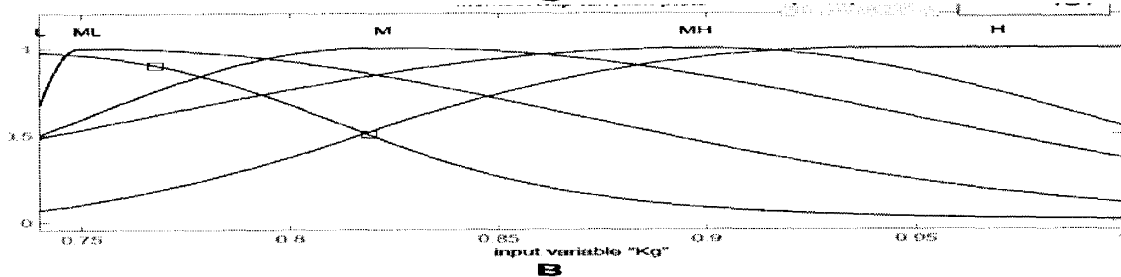
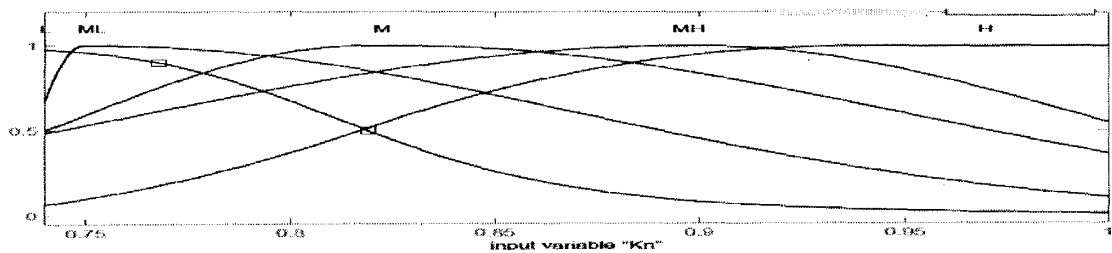
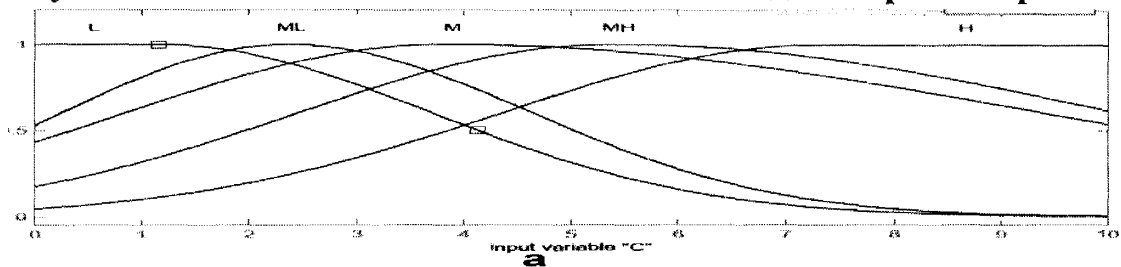
		вібропереміщення						
	терм	[0,7)	[7,14)	[14,21)	[21,28)	[28,35)	[35,43)	[43,50)
Експерт 1	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	1	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 2	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	0	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	1	0	0
	MH	0	0	0	1	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 3	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	0	0	0	0	0
	M	0	1	1	1	0	0	0
	MH	0	0	0	1	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 4	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	0	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 5	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	0	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	0	0	0
	MH	0	0	0	1	1	0	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
узагальнений коефіцієнт технічного стану								
	терм	[0.5,0.57)	[0.57,0.64)	[0.64,0.71)	[0.71,0.78)	[0.78,0.85)	[0.85,0.93)	[0.93,1)
Експерт 1	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	0	1	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 2	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	0	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 3	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	1	1	1	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	1	1
Експерт 4	L	1	0	0	0	0	0	0
	ML	0	1	1	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0
	MH	0	0	0	0	1	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1
Експерт 5	L	1	1	0	0	0	0	0
	ML	0	0	1	1	0	0	0
	M	0	0	0	0	1	0	0
	MH	0	0	0	0	0	1	0
	H	0	0	0	0	0	0	1

## Додаток Д

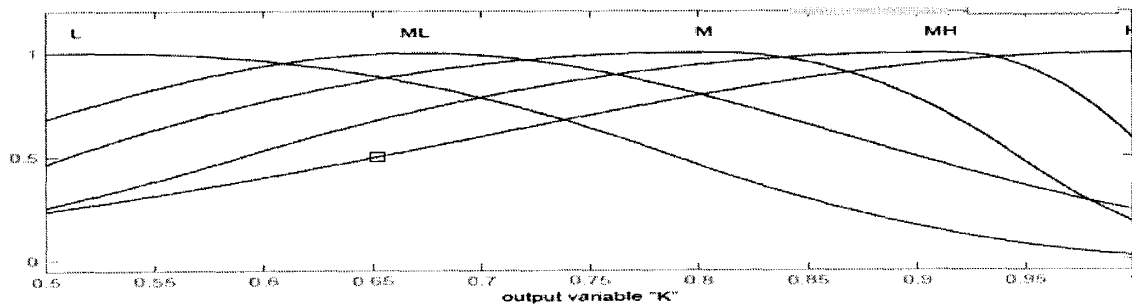
Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $C_i$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(n)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(r)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $V_i^{(v)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $S_i^{(v)}$ Графіки функції належності для термів змінної  $k_i^T$ 

## Додаток Е

### Функції належності вхідних змінних за методом парних порівнянь

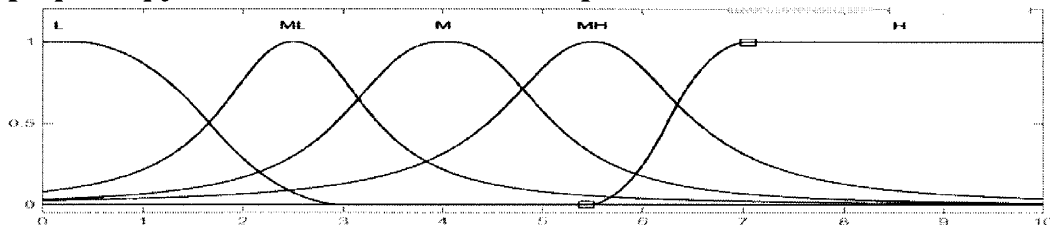
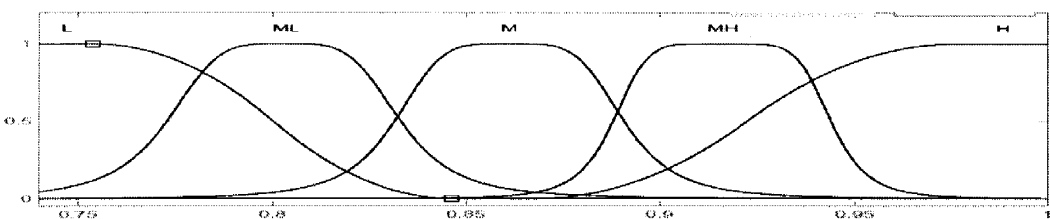
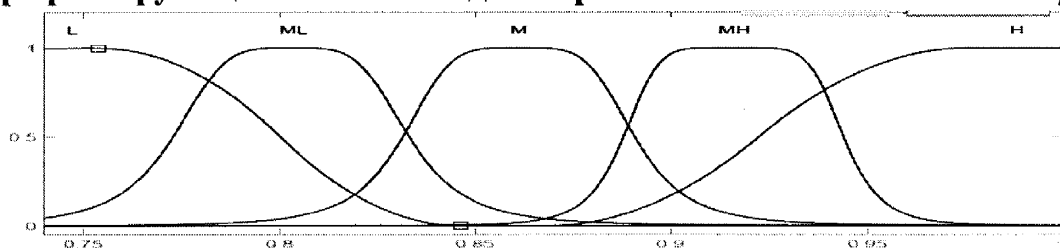
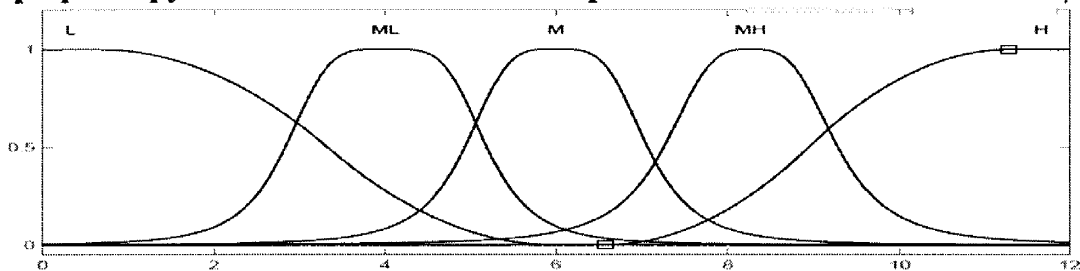
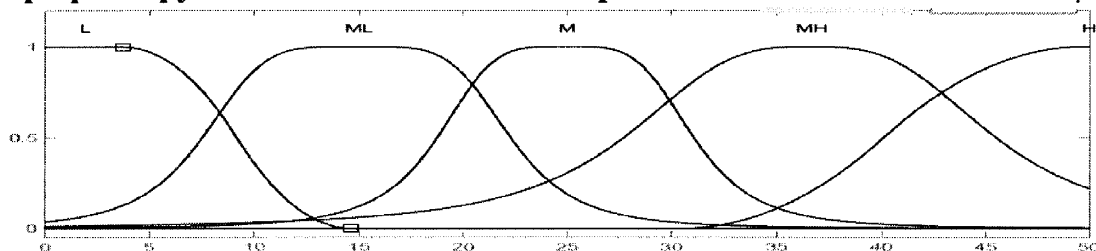
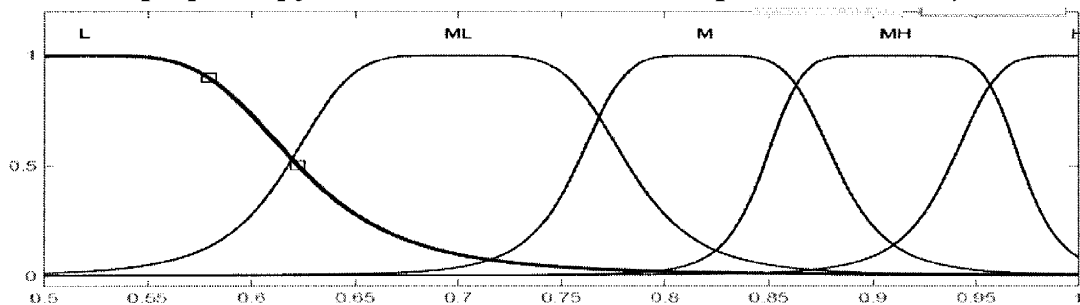


### Функції належності вихідної змінної за методом парних порівнянь



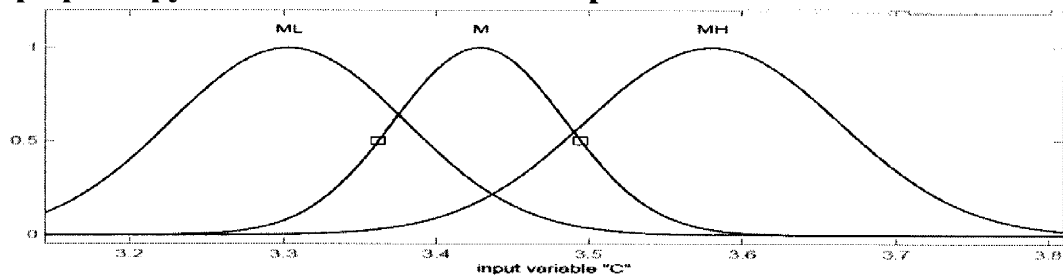
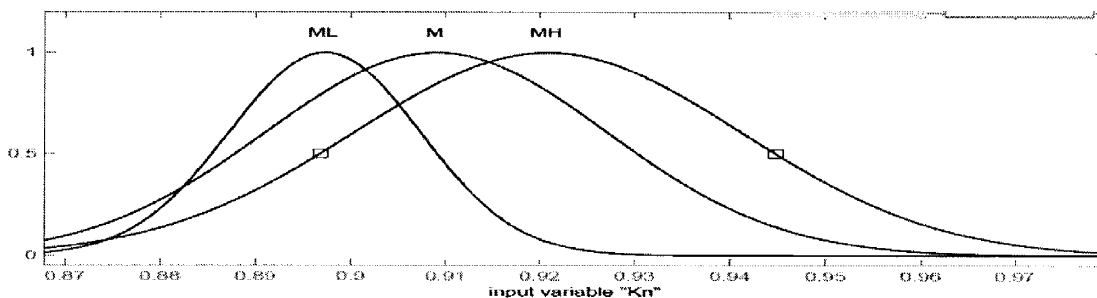
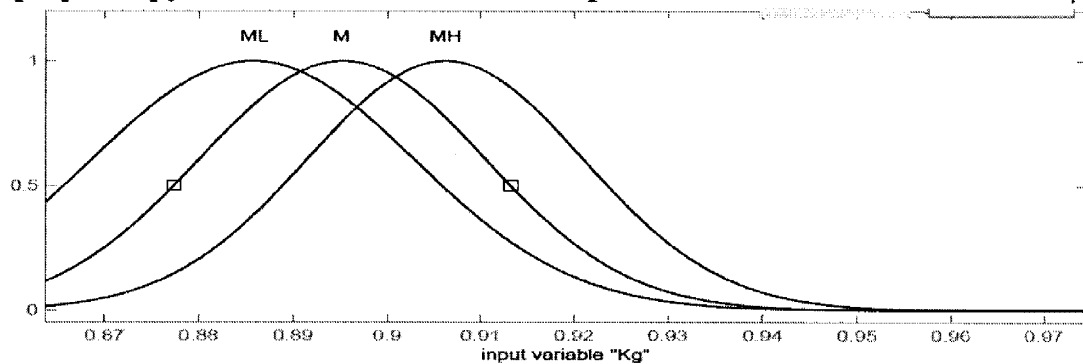
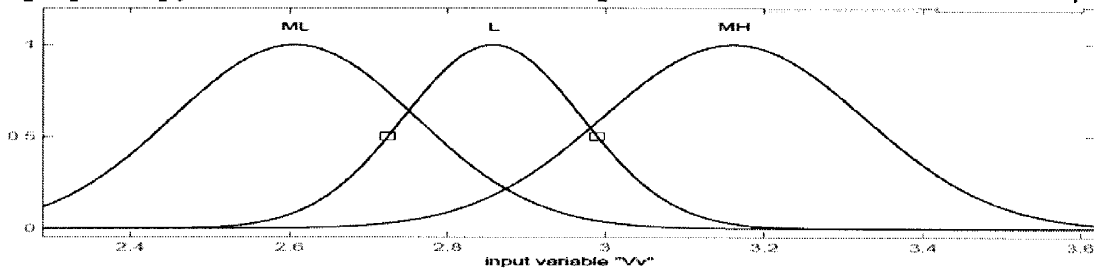
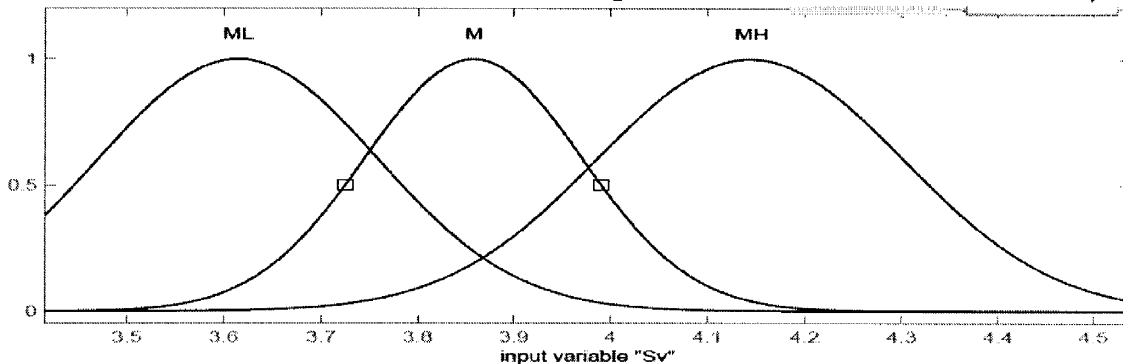
e

## Додаток Ж

Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $C_i$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(H)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(r)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $V_i^{(v)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $S_i^{(v)}$ Графіки функції належності для термів змінної  $k_i^T$ 



## Додаток К

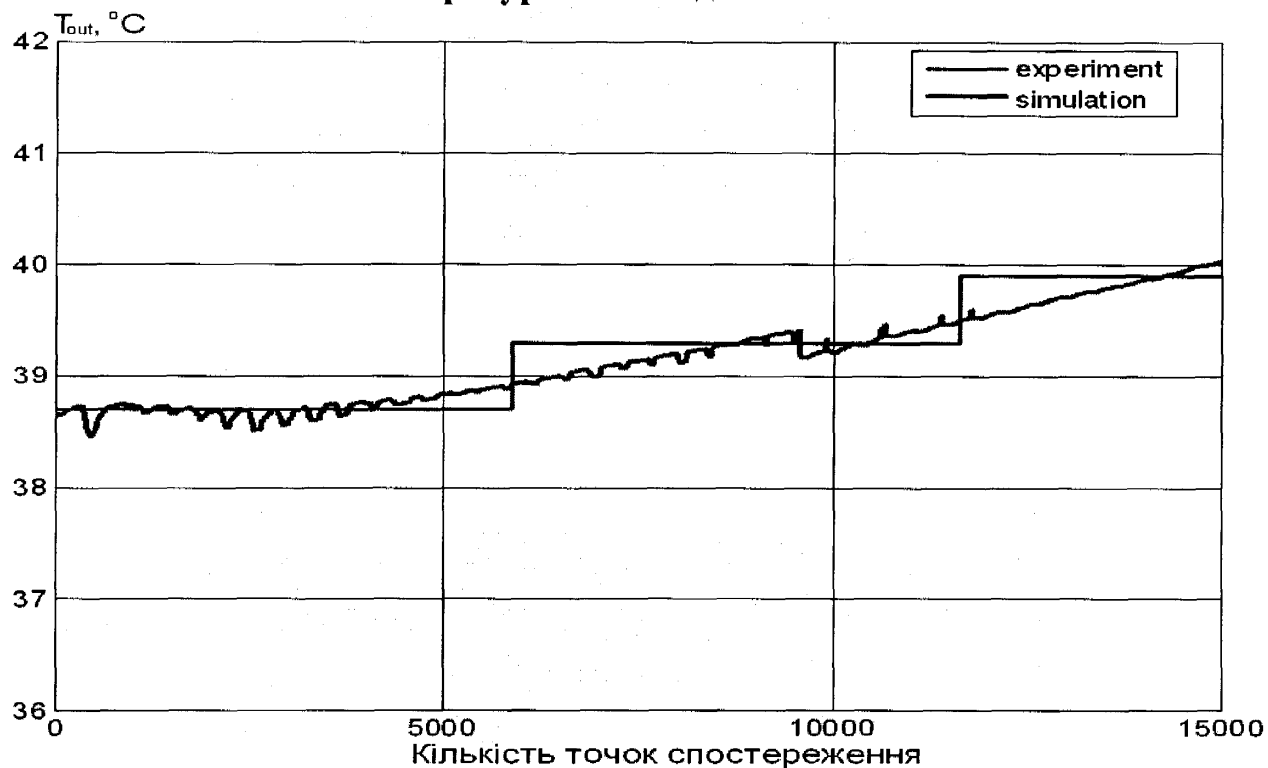
Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $C_i$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(H)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $K_i^{(r)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $V_i^{(v)}$ Графіки функції належності для термів лінгвістичної змінної  $S_i^{(v)}$ 



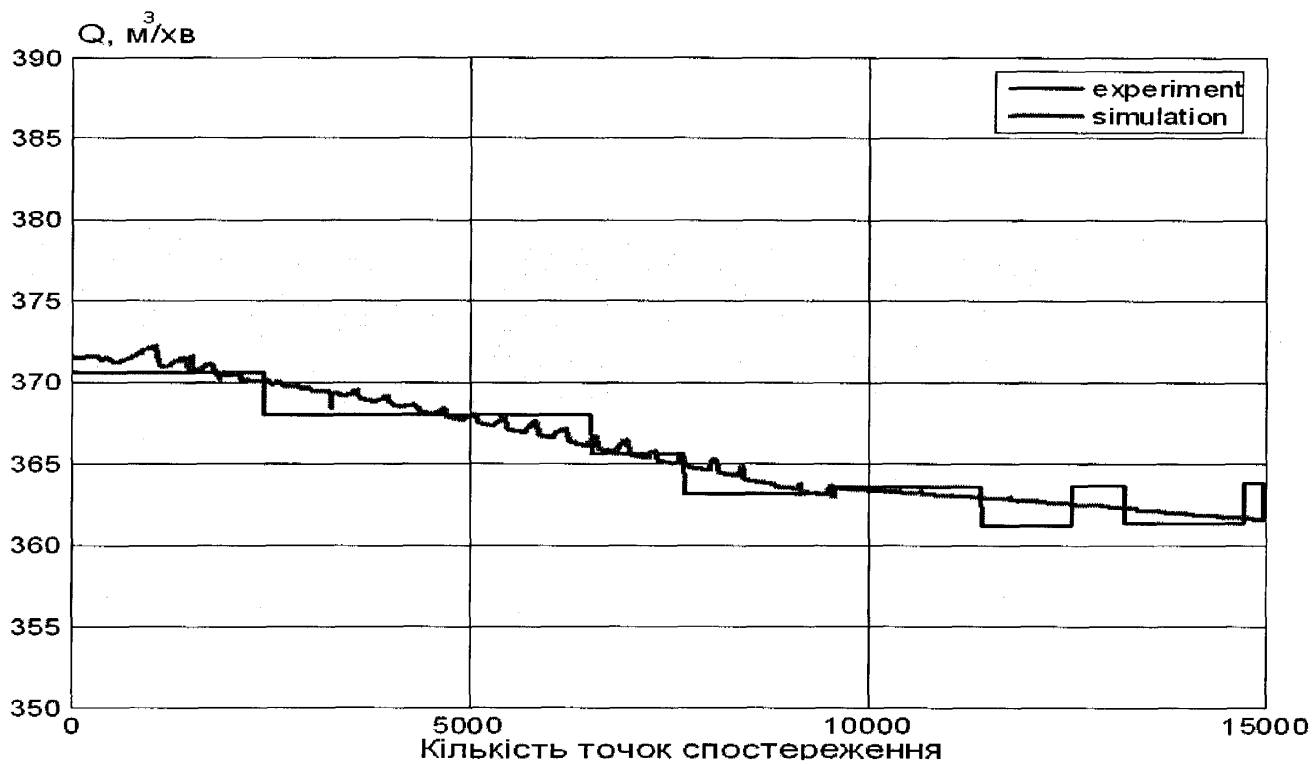


Додаток Л  
Апроксимація параметрів ГПА

Температура на виході із нагнітача

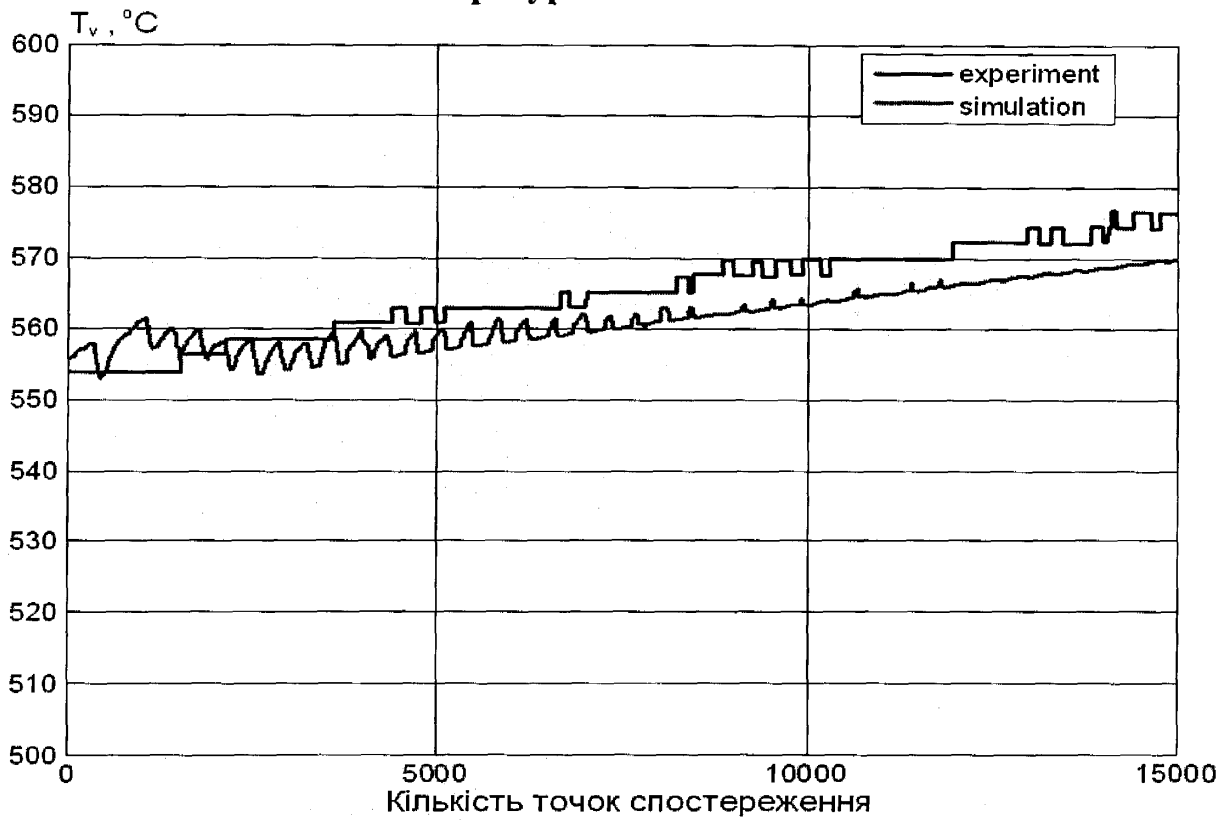


Продуктивність нагнітача

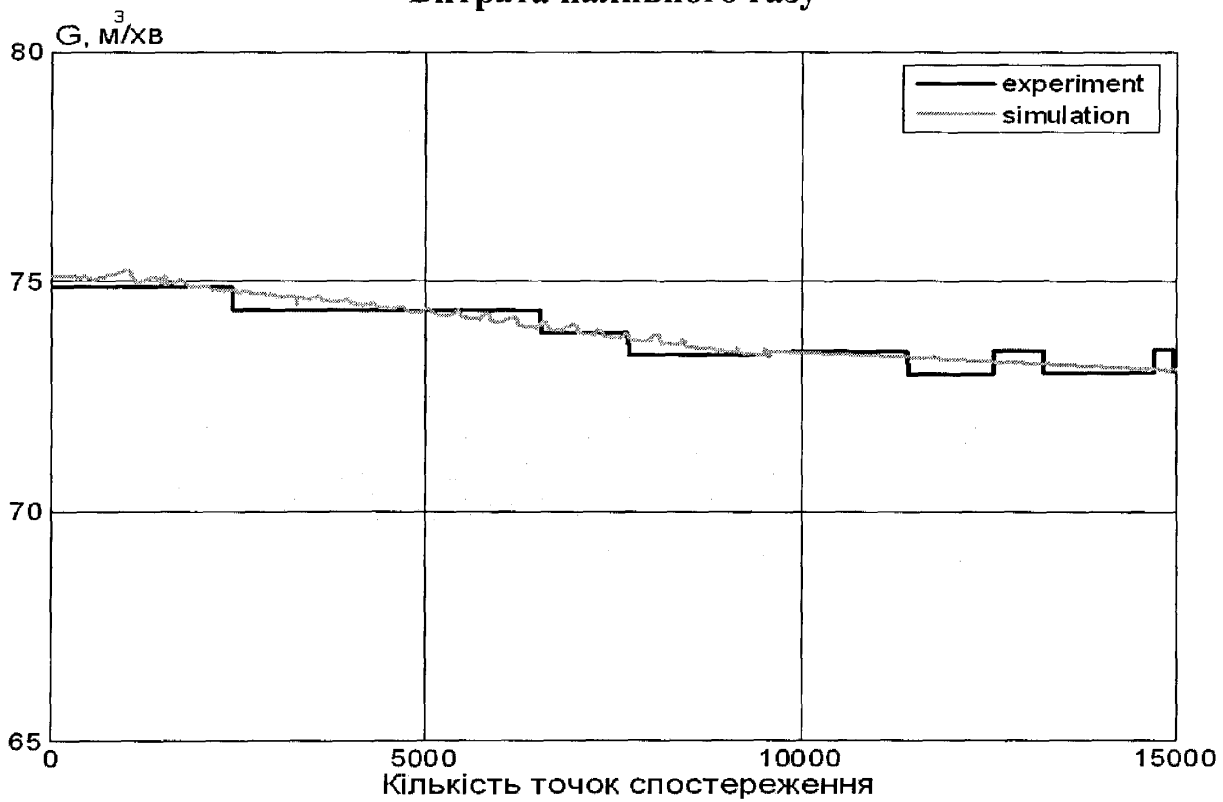


## Додаток Л (продовження)

## Температура газів після ТНТ



## Витрата паливного газу



## Додаток М

## Лістинг МГВА-Програми ідентифікації статистики нагнітача (на прикладі температури газів за ТНТ)

## M.1 SCRIPT

```

%Метод групового врахування
аргументів (комбінаторний
алгоритм)
%=====МГВА=====
=====
%Температура природного газу на
виході із нагнітача
%=====
=====
%Вихідні дані
%st-найбільша степінь полінома
%L-число аргументів
%M-число точок масиву
%mp-довжина перевіркої
послідовності
%me-довжина екзаменаційної
послідовності
%cb-число кращих моделей, які
відбираються на першому етапі
%(свобода вибору)
%KL-ключ:KL=1-синтез моделі тільки
з вільними членами
%      KL=2-синтез моделі без
вільних членів
%      KL=0-виконується повний
перебір
%kry-ключ виводу даних про
апроксимацію:
%      kry=0-дані не виводяться
%      kry=1-дані виводяться
%cri-задання критерію:cri=0-
регулярність
%      cri=1-
зміщення
%      cri=2,
cri=3-комбіновані
%nm-число рівнянь ідентифікації
%X-масив початкових аргументів
(MxL)
%Y-масив даних вихідної величини
(Mx1)
%-----
-----
%Вихід
%M0-довжина масиву навчальної
послідовності
%N-число членів повної моделі,
включаючи вільний член
%PS-масив коефіцієнтів моделей
оптимальної складності (Nxcb)
%OS-масив значень критерію відбору
(1xcb)
%-----
-----
%Параметри алгоритму
KL=1;
cri=1;
nm=1;
ct=2;
pry=1;
cb=3;
%-----
-----
%Вхідні дані
%-----
-----
%Вхідні величини об'єкта
%1-ий стовпець: температура газу
при вході в нагнітач, град. С
%2-ий стовпець:число обертів вала
двигуна, %
%3-ий стовпець:ступінь підвищення
тиску газу
%4-ий стовпець:тиск на вході в
нагнітач, кгс/кв.см.
%5-ий стовпець:температура
навколишнього середовища,град. С
%load XTout3.mat;load YTout3.mat;
XE=XTout3;YE=YTout3;
XX=[XE YE];
%Параметри програми
[M,n]=size(XE);
L=n;
mp=round(0.5*M);
me=round(0.1*M);
%-----
-----
%Інформація про роботу алгоритма
M0=M-mp-me;
fprintf('АЛГОРИТМ combi\r')
fprintf('Число
аргументів%2.0g\r',L)
fprintf('Максимальна степінь
полінома%2.0g\r',ct)
fprintf('Всього точок M=%3.0f.
Розділення масиву:\r',M)
fprintf('-навчальна вибірка
M0=%3.0f\r',M0)
fprintf('-перевірна вибірка
mp=%3.0f\r',mp)

```

## Додаток М (продовження)

```

fprintf('-екзаменаційна вибірка
me=%3.0f\r',me)
fprintf('Критерій-')
if cri==0
    fprintf('регулярність\r')
end
if cri==1

    fprintf('незміщенність\r')
end
if cri>1
    fprintf('Комбінований ')
    if cri==2
        fprintf('незміщений+СКВ\r')
    else
        fprintf('незміщений+похибка
на экзаменаційні вибірці\r')
    end
end
fprintf('Число кращих моделей
першого етапу cb=%2.0f\r',cb)
fprintf('Перебір ')
if KL==0
    fprintf('повний\r')
end
if KL==1
    fprintf('з вільним членом\r')
end
if KL==2
    fprintf('з без вільного
члена\r')
end
if pry==0
    fprintf('Інформація про
апроксимацію не виводиться\r')
end
%-----
-----
N=1;
for j=1:L

    N=N*(ct+j)/j;
end
%-----
-----
%Визначення max, min для кожної
вхідної змінної
%та для виходу об'єкта. Нормування
змінних та виходу об'єкта
for i=1:n+1
    xs(1,i)=max(XX(:,i));
    xs(2,i)=min(XX(:,i));
    XX(:,i)=(XX(:,i)-
xs(2,i)*0.000001)/(xs(1,i)*0.00000
1-xs(2,i));
end
FY=XX;
FY(:,n+1)=[];
X=FY;
Y=XX(:,n+1);
%-----
-----
for i=1:nm
    if nm>1
        fprintf('Рівняння');
        fprintf('%4.2g\r',i);
    end

    [PS,OS]=combi(ct,L,M,mp,me,cb,cri,
KL,pry,X,Y,YE);
    for F=1:cb
        fprintf('%2.0f-модель
значення критерію
%8.2g\r',F,OS(F))
        fprintf('Коефіцієнти
моделі\r')
        for j=1:N
            fprintf('%8.2g\r',PS(j,F))
        end
    end
end
end

```

## Додаток М (продовження)

## М.2 М-файл: combi.m

```

function
[PS, OS]=combi(ct, L, M, mp, me, cb, cri,
kl, pry, X, Y, YQ1)
%Комбінаторний алгоритм методу
групового врахування аргументів
%=====
%=====
%Параметри, що обчислюються:
%id-розширений масив даних розміру
MxN, який побудований за
%даними масиву X з врахуванням
степені. Обчислюється у файл-
%програмі fod.
%YS-масив розміру 1xM результатів
апроксимації функцій за
%кжною із побудованих моделей.
%FS, FS1-масиви ситем нормальних
рівнянь розмірами Nx(N+1), які
%отримані за методом найменших
квадратів на частинах А і В
%масиву id. Будуються у файл-
прграмі nos.
%P, P1-проміжні масиви розміру 1xN
кожний для запису коефіцієнтів
%часткових моделей, які ортимані на
чвстинах А і В.
%oe-масив розміру 1xcb помилок
екстраполяції на частині С
%початкових даних.
Y_min=min(YQ1);
Y_max=max(YQ1);
d_Y=Y_max-Y_min;
N=1;
for j=1:L
    N=N*(ct+j)/j;
end
chk=2^N-1;
id=fod(ct, L, M, X);
FS=nos(N, 1, M-mp-me, id, Y);
if cri>0
    FS1=nos(N, M-mp-me+1, M-
me, id, Y);
end
    if kl==1
        lb=(chk+1)/2;
else
    lb=1;
end
    if kl==2
        ub=(chk-1)/2;
    else
        ub=chk;
    end
    chk=ub-lb+1;
    fprintf('Число членів %6.2f
моделей %6.2f \r', N, chk)
    if mp==0
        c=1;
    else
        c=M-mp-me+1;
    end
    if kl==1
        D=des(lb-1, N, 2);
    else
        D=des(0, N, 2);
    end
    for q=lb:ub
        D=regi(D, N, 2);
        P=pap(D, N, FS);
        if cri==0
            osh=0;
            for j=c:M-me
                z=0;
                for i=1:N
                    z=z+P(i)*id(j, i);
                end
                osh=osh+(z-Y(j))^2;
            end
        else
            P1=pap(D, N, FS1);
            osh=0;
            for j=1:M-me
                z=0; fi=0;
                for i=1:N
                    z=z+P(i)*id(j, i);
                end
                fi=fi+P1(i)*id(j, i);
                osh=osh+(z-fi)^2;
            end
        end
        if q<lb+cb
            F=q-lb+1;
        else
            [R, F]=mx(OS, cb);
            if osh>=R
                continue
            end
        end
    end
end

```

## Додаток М (продовження)

```

OS(F)=osh;
DF(F)=q;
end
fi=0;
for j=1:M
    fi=fi+Y(j)^2;
    if j==N-mp-me
        z=fi;
    end
    if j==M-me
        ja=fi;
    end
end
if and(cri==0,mp~=0)
    z=ja-z;
else
    z=ja;
end
for i=1:cb
    OS(i)=OS(i)/z;
end
if cri==0
    fprintf('Похибка
перевірний вибірці\r')
else
    fprintf('Зміщення\r')
end
fprintf('%8.3g\r', OS)
if cri>=2
    [R,F]=mx(OS,cb);
    for i=1:cb
        ks(i)=OS(i)/R;
    end
    fprintf('Зміщення\r')
    fprintf('%8.3g\r', ks)
end
if pry==1
    %fprintf('Апроксимація\r')
    FS=nos(N,1,M-me,id,Y);
    %fprintf('%8.3g\r',FS)
end
for F=1:cb
    D=des(DF(F),N,2);
    P=pap(D,N,FS);
    for i=1:N
        PS(i,F)=P(i);
    end
    osh=0;
    for j=1:M
        z=0;
        for i=1:N
            z=z+P(i)*id(j,i);
        end
    end
    if pry==1
        YS(j)=z;
    end
    osh=osh+(z-Y(j))^2;
    if j==M-me
        R=osh;
    end
    end
    OS(F)=sqrt(R/ja);
    if me~=0
        oe(F)=sqrt((osh-R)/(fi-
ja));
    end
    if pry==1
        fprintf('Модель %4.2g
\r',F)
        fprintf('%10.4g\r',YS)
        subplot(1,2,1)
        plot(1:M,Y,'o-
',1:M,YS,'+-')
        hold on
        YS_r=YS*d_Y+Y_min;
        subplot(1,2,2)
        plot(1:M,YQ1,'o-
',1:M,YS_r,'+-')
        hold on
    end
end
if me~=0
    fprintf('Похибка')
    fprintf('%10.2g \r',oe)
end
if cri>=2
    if cri==2
        [R,F]=mx(OS,cb);
    else
        [R,F]=mx(OS,oe);
    end
    for F=1:cb
        if cri==2
            oe(F)=OS(F)/R;
        else
            oe(F)=oe(F)/R;
        end
    end
    OS(F)=sqrt(ks(F)^2+oe(F)^2);
    end
    fprintf('%10.2 \r',oe) ;
end

```

## Додаток Н

### Кореляційний зв'язок між величинами

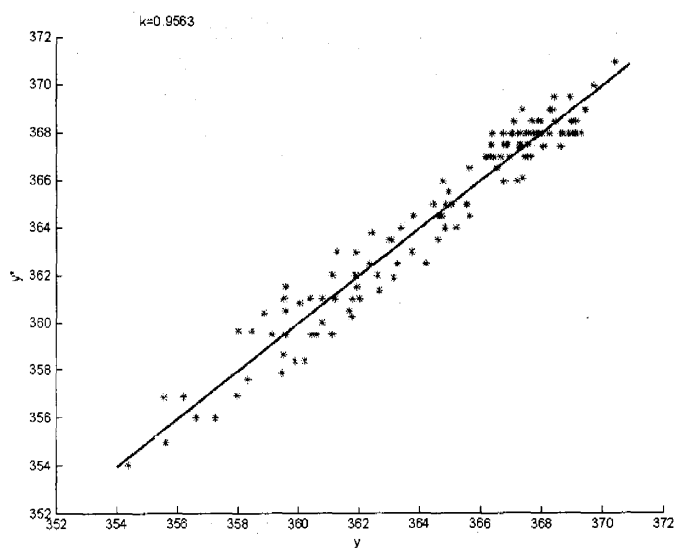


Рис. Н.1. Продуктивність нагнігача

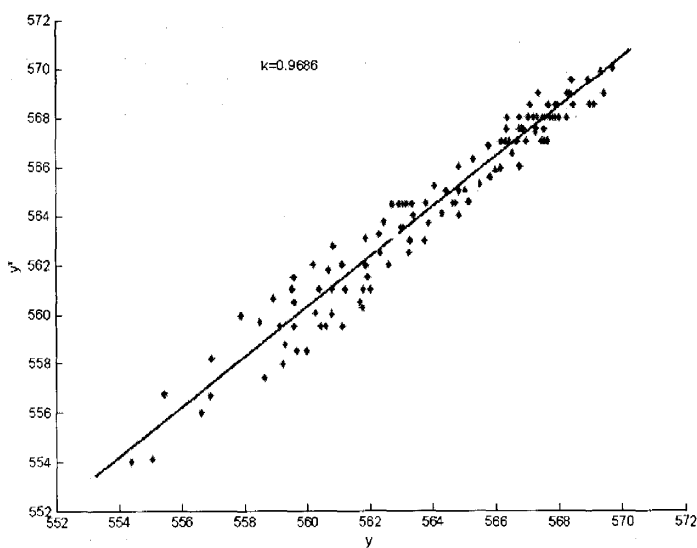


Рис. Н.2. Температура газів на виході ТНТ

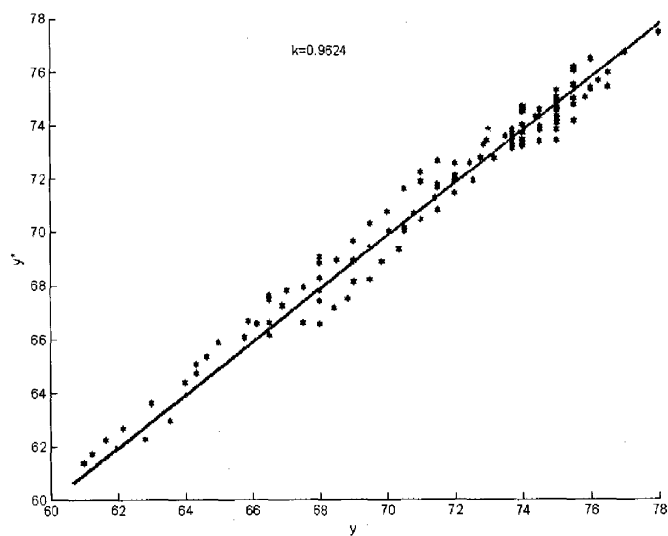


Рис. Н.3. Витрата паливного газу



## Додаток Р

## Лістинг програм ідентифікації параметрів

## Р.1 МНК-Програма ідентифікації статистики нагнітача (на прикладі температури газів за ТНТ)

## Р.1.1 SCRIPT

```

%Витрата паливного газу
load XQ1.mat;load YQ1.mat;
X=XQ1;Y=YQ1;
[n,m]=size(X);
qj=2;
%Q-макс.степінь полінома (Q<=4)
Q=2;
Z=fun_kp(m,qj,Q);
[n1,m1]=size(Z);
ks=Z(n1,m1);
    if Q<=2 P=fun_ort(m,ks);
else
    if Q==3 P=fun_orto(m);
else
    Q1=fun_orto(m);
    Q2=fun_ortol(m);
    P=[Q1 Q2];
end
end
for p=1:ks
    for j=1:n
        pr=mnk_pr(X,P,j,p,m);
        F(j,p)=pr;
    end
end
%Метод найменших квадратів
M=F'*F;C=M^(-1);
a=C*F'*Y; YR=F*a;
    for i=1:n; nn(i)=i;
    end
    delta=100*(YR-Y)./Y;
    figure(1)
    [mr,b,r]=postreg(YR',Y');
    disp('коэф.регресії r_M=');
    disp(r);
    disp('Оцінка дисперсії s^2=');
    sigma=sum((YR-Y).^2)/(n-1);
    disp(sigma);
    %Метод сингулярного розкладу
    матриці фішера
    [U,S,V]=svd(F,0);
    a_sr=V*S^(-1)*U'*Y;
    yr=F*a_sr;
    delta_sr=100*(yr-Y)./Y;
    sigma_sr=sum((yr-Y).^2)/(n-1);
    disp('Оцінка дисперсії s_sr^2=');
    disp(sigma_sr);
    [ms,bs,rs]=postreg(yr',Y');
    disp('коэф.регресії r_S=');
    disp(rs);
    subplot(2,2,1),plot(nn,Y,'-m',nn,YR,'-b')
    legend('експеримент','розрахунок')
    subplot(2,2,2),plot(nn,delta,'v')
    subplot(2,2,3),plot(nn,Y,'-m',nn,yr,'-b')
    legend('експеримент','розрахунок')
    subplot(2,2,4),plot(nn,delta_sr,'v')
    Q01=P;aQ1=a_sr;
    save Q01.mat;save aQ1.mat;

```

## Р.1.2 М-ФАЙЛ: fun\_kp.m

```

function Z=fun_kp(N,qj,Q)
for i=2:N+1; QQ(i)=qj;
end
for i=2:N+1
    s=i-1;
    for j=1:Q+1
        if s==1
            Z(s,j)=1;
        end
        if j==1
            continue
        end
        k=j-1;
        if k==1
            Z(i,k)=1; r=k-QQ(i);
        end
        if r>=1
            Z(i,j)=Z(i,k)+Z(s,j)-Z(s,r);
        else
            Z(i,j)=Z(s,j)+Z(i,k);
        end
    end
end
Z(1,:)=[];

```

## Додаток Р (продовження)

### Р.1.3 М-ФАЙЛ: fun\_orto.m

```

function X=fun_orto(n)
nf=3;f=1;
while f<=nf
    switch f
        case 1
            qq=[1 1 1 1 1];
            rf=1;q=2;
        case 2    rf=1;q=3;
        case 3    qq=[1 2 3 4 5];
            rf=2;q=3;
        end
    r=0; S2=0;
    for i=1:n
        if S2<q
            Q(i)=qq(i);
            S2=S2+Q(i);
        else
            Q(i)=0;
        end
    end
    for i=1:n
        if Q(i)~=0;    r=r+1;
        end
    end
    P=perms(Q); U=P';
    [n1,m1]=size(U);
    c1=factorial(n1);
    c2=factorial(r);
    c3=factorial(n1-r);
    mm=rf*c1/(c2*c3);
    while m1>mm;    z=1;
    for k=1:m1-1
        for j=k+1:m1
            if U(:,k)==U(:,j)
                U(:,j)=[];
                m1=m1-1;z=0;
                break
            end
        end
        if z==0
            break
        end
    end
    end
    switch f
        case 1    P1=U;
        case 2    P2=U;
        case 3    P3=U;
    end
    f=f+1;
    end
    X2=[P1 P2 P3];
    X0=zeros(n,1);
    X1=eye(n);
    X3=2*X1;X4=3*X1;
    X=[X0 X1 X2 X3 X4];
    [z1,z2]=size(X);

```

### Р.1.4 М-ФАЙЛ: fun\_ort.m

```

function Q=fun_ort(N,K)
SN=1;QI=1;RC=1;FF=N^2;
    for i=1:N; Q(i,SN)=0;
    end
    jj=N+2;
    while jj<=K
        IS=1;
        for j=SN+1:SN+N
            for i=1:N
                if i==IS
                    Q(i,j)=RC;
                else
                    Q(i,j)=0;
                end
            end
            IS=IS+1;
        end
        end
        QI=QI+1;A=2;IM=1;
        while jj<=FF
            IS=A;
            [SQ,Q]=fun_s(N,IM,Q,IS,jj);
            while SQ==QI
                jj=jj+1;IS=IS+1;
            end
            [SQ,Q]=fun_s(N,IM,Q,IS,jj);
            end
            C=factorial(N)/(factorial(QI)*factorial(N-QI));
            FF=N+1+C; A=A+1;IM=IM+1;
            [SQ,Q]=fun_s(N,IM,Q,IS,jj);
            end
            RC=RC+1;SN=jj-1;jj=jj+N-1;
        end

```





## Додаток Р (продовження)

```

qq(:, km+1:mj)=[];
disp('Матр. показ.
полінома'); disp (qq);
end
for j=1:km
    for i=1:km
        if j>=i
            continue
        else
            AB=0;
            for L=j+1:i-1
                AB=AB+A(L, i)*A(L, j);
            end
            A(i, j)=-
(A(j, i)+AB);
        end
    end
end
disp('Коеф. регресії');
for i=1:km
    AK=0;
    for j=i+1:km
        AK=AK+B(j)*A(j, i);
    end
    AZ(i)=B(i)+AK;
end
ZA=AZ;
disp(AZ);
SX=0;
for jб=1:NS
    YR0=0;
    for sz=1:km
        pr1=fun_pr1(X, Q0, N, sz, jб);
        YR0=YR0+pr1*AZ(sz);
    end
    YR(jб)=YR0;
    SX=SX+(Y(jб)-YR0)^2;
end
disp('Залишкова сума
кв. S='); disp(S);
if km<=k1
    disp('Середньокв. відхил. SX='); disp
(SX);
    disp('Обч. закінчені');
end
for i=1:NS
    nn(i)=i;
end
QQ01=qq; aQQ1=AZ;
save QQ01.mat; save aQQ1.mat;
delta=100*(YR'-Y)./Y;
dl=mean(abs(delta));
disp('Серед. зн. пох. апрок. dl=');
disp(dl);
disp('Оцінка дисперсії s^2=');
sigma=sum((YR'-Y).^2)/(NS-1);
disp(sigma);
subplot(2, 2, 1), plot(nn, Y, '-
m', nn, YR, '-b')
legend('експеримент', 'розрахунок')
subplot(2, 2, 2), plot(nn, delta, 'v')
k=1;
for z=80:2:100
    R2=fun_RR2(z, AZ, qq);
    y2(k)=R2;
    xx(k)=z; k=k+1;
end
[m_or, b, r]=postreg(YR, Y');
disp('Коеф. кор. k=');
disp(m_or);
subplot(2, 2, 3), plot(xx, y2)

```

### P2.2 М-ФАЙЛИ fun\_RR1.m, fun\_RR2.m

```

function f=fun_RR1(zz, a, q)
xy(1)=zz;
xy(2)=20; xy(3)=1.35;
xy(4)=49; xy(5)=-6;
[m, kf]=size(q);
f=0;
for p=1:kf
    pu=1;
    for i=1:m
        pu=pu*xy(i)^q(i, p);
    end
    f=f+a(p)*pu;
end

function f=fun_RR2(zz, a, q)
xz(1)=20;
xz(2)=zz; xz(3)=1.35; xz(4)=49;
xz(5)=-6;
[m, kf]=size(q);
f=0;
for p=1:kf
    pu=1;
    for i=1:m
        pu=pu*xz(i)^q(i, p);
    end
    f=f+a(p)*pu;
end

```

## Додаток Р (продовження)

## Р2.3 М-ФАЙЛИ fun\_fs.m, fun\_pr.m і fun\_pr1.m

```

%Підпрограма до програми ORTO.m
function FS=fun_fs(x,q,n,ns,su)
fs=0;
for in=1:ns
    jb=in;pr=1;
    for ib=1:n
        if q(ib,su)==0
            continue
        end
        pr=pr*x(jb,ib)^q(ib,su);
    end
    fs=fs+pr^2;
end
FS=fs;

```

```

function pr=fun_pr(X,Q,N,SU,jb)
pr=1;
for ib=1:N
    if Q(ib,SU)==0
        continue
    end
    pr=pr*X(jb,ib)^Q(ib,SU);
end

```

```

%Підпрограма до програми ORTO.m
function pr1=fun_pr1(X,Q0,N,SZ,jb)
pr1=1;
for ib=1:N
    if Q0(ib,SZ)==0
        continue
    end
    pr1=pr1*X(jb,ib)^Q0(ib,SZ);
end

```

## Додаток С

### Програма розв'язку задачі оптимізації роботи ГПА (SCRIPT - файл)

```

%Задача оптимізації
%Продуктив.КС
Q_max;
%К_ть прац.компресорів
N;
%Темпер.газу на вході в нагнітач
tvq;
%Степінь стис.газу
E;
%Тиск на вх.нагнітача
Pvg;
%Температура навколишнього середовища
tc;
%Тиск навколишнього середовища
Pc;
global zet;
global zet1;
zet=[tvq E Pvg tc Pc];
zet1=[Q_max N];
%Початкові обмеж.обертів нагнітача
nn1_min;
%Обмеж. (темп.газу)
t1_max;
[ntx1_max,ntx1_min]=fun_ogr(t1_max,nn1_min,zet);
%Обмеж. (темп.вихлоп.газів)
tv1_max;
[ngx1_max,ngx1_min]=fun_ogr1(tv1_max,nn1_min,zet);
nx1_min=max([ntx1_min,ngx1_min]);
nx1_max=min([ntx1_max,ngx1_max]);
%Програма оптимізації
x0=[90,90];
if x0(1)<nx1_min
    x0(1)=nx1_min+0.5;
end
options=optimset('LargeScale','off');
lb=[nx1_min];ub=[nx1_max];
[x,Gval,exitflag]=fmincon(@fun_G,x0,[],[],[],[],lb,ub,@fun_ceq,options,zet
,zet1);

```

#### С.1 М – ФАЙЛ: fun\_G.m

```

function G=fun_G(x,zet,zet1)
load QG.mat;load QA0.mat;
load aG.mat;load aQA.mat;
z1=x(1);
R1=fun_R1(z1,aG,QG,zet);
G=zet1(2)*R1;

```

**Додаток С (продовження)****С.2 М – ФАЙЛ: fun\_seq.m**

```
function [c,ceq]=fun_seq(x,zet,zet1)
tz1=x(1);
load QG1.mat;load aG1.mat;
load QQN.mat;load aQN.mat;
R1=fun_R1(tz1,aG1,QG1,zet);
ceq=zet1(2)*R1;
c=[];
```

**С.3 М – ФАЙЛИ: fun\_R1.m і fun\_R2.m**

```
function f=fun_R1(zz,a,q,z)
xy(1)=zz;
xy(2)=z(1);xy(3)=z(2);
xy(4)=z(3);xy(5)=z(4);
[m,kf]=size(q);
f=0;
for p=1:kf
    pu=1;
    for i=1:m
        pu=pu*xy(i)^q(i,p);
    end
    f=f+a(p)*pu;
end
```

```
function f=fun_R2(zz,a,q,z)
xz(1)=z(1);
xz(2)=zz;xz(3)=z(2);xz(4)=z(3);
xz(5)=z(4);
[m,kf]=size(q);
f=0;
for p=1:kf
    pu=1;
    for i=1:m
        pu=pu*xz(i)^q(i,p);
    end
    f=f+a(p)*pu;
end
```

**С.4 М – ФАЙЛ: fun\_org.m**

```
function
[nx1_max,nx1_min]=fun_ogr(t1_max,n
n1_min,zet)
load QTW;load aTW;
load QT0;load aTA;
q1=QTW;a1=aTW;
QQ1=max(max(q1));
Q=QQ1;
for i=1:Q+1
    switch i-1
        case 0
            at0=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
        case 1
```

```
            at1=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
        case 2
            at2=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
        case 3
            at3=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
    end
    end
    c1=[at3 at2 at1 at0-t1_max];

    [n1_max,n1_min]=fun_r(c1,nn1_min);
    nx1_max=min([100 n1_max]);
    nx1_min=n1_min;
```



## Додаток С (продовження)

## С.5 М – ФАЙЛИ: fun\_a1.m i fun\_a2.m

```

function ai=fun_a1(a,q,Q,i,z)
x(1)=0;x(2)=z(1);x(3)=z(2);
x(4)=z(3);x(5)=z(4);
ai=0;[m,kf]=size(q);
    for p=1:kf
        if q(1,p)==i-1
            pr=1;
            for k=1:m
                if k~=1
pr=pr*x(k)^q(k,p);
                    end
                end
                ai=ai+a(p)*pr;
            end
        end
    end
end

```

```

function ai=fun_a2(a,q,Q,i,z)
x(1)=z(1);x(2)=0;x(3)=z(2);
x(4)=z(3);x(5)=z(4);
ai=0;[m,kf]=size(q);
    for p=1:kf
        if q(2,p)==i-1
            pr=1;
            for k=1:m
                if k~=2
pr=pr*x(k)^q(k,p);
                    end
                end
                ai=ai+a(p)*pr;
            end
        end
    end
end

```

## С.6 М – ФАЙЛ: fun\_org1.m

```

function [nx1_max,nx1_min]=fun_ogr1(t1_max,nn1_min,zet)
load QGG1;load aGG1;
load QTT1;load aTT1;
q1=QGG1;a1=aGG1;
QQ1=max(max(q1));
Q= QQ1;
for i=1:Q+1
    switch i-1
        case 0
at0=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            case 1
at1=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            case 2
at2=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            case 3
at3=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            end
    end
c1=[at3 at2 at1 at0-t1_max];
[n1_max,n1_min]=fun_r(c1,nn1_min);
nx1_max=min([100 n1_max]);
nx1_min=n1_min;

```

## Додаток Т

## Текст програми –інтегратора

```

Private Sub cmdExit_Click()
End
End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()
txtTg1.ControlSource = "c96"
txtTg2.ControlSource = "c96"
txtTg3.ControlSource = "c96"
txtTp1.ControlSource = "c96"
txtTp2.ControlSource = "c96"
txtGp3.ControlSource = "c96"
txtGp1.ControlSource = "c96"
txtGp2.ControlSource = "c96"
txtQ1.ControlSource = "c96"
txtQ3.ControlSource = "c96"
txtQ2.ControlSource = "c96"
txtQ.ControlSource = "c96"
txtx1.ControlSource = "c96"
txtx2.ControlSource = "c96"
txtx3.ControlSource = "c96"
txtO1.ControlSource = "c96"
txtO2.ControlSource = "c96"
txtO3.ControlSource = "c96"
End Sub

Private Sub CommandButton4_Click()
frmMMKC.Show
End Sub

Private Sub CommandButton5_Click()
Worksheets("Лист1").Range("d19").V
alue = txtZadoper.Value
Worksheets("Лист2").Range("b44").V
alue = txtPvg.Value
Worksheets("Лист2").Range("b45").V
alue = txtPvux.Value
Worksheets("Лист2").Range("b42").V
alue = txttc.Value
Worksheets("Лист2").Range("b43").V
alue = txttvq.Value
Worksheets("Лист2").Activate
Range("B40").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=R[5]C/R[4]C"
Calculate
txtE.Value =
Worksheets("Лист2").Range("b40").V
alue
Worksheets("Лист1").Activate
txtRes1.ControlSource = "d10"
txtRes2.ControlSource = "c10"
txtRes3.ControlSource = "b10"
Worksheets("Лист2").Activate
Worksheets("Лист2").Range("b42").V
alue = txttc.Value
Worksheets("Лист1").Activate
SolverOk SetCell:="$A$36",
MaxMinVal:=2, ValueOf:="0",
ByChange:="$B$26:$D$26"
SolverSolve
Range("B26:D26").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Worksheets("Лист2").Select
Range("B25:D25").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Worksheets("Лист1").Select
Range("A31:D31").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Worksheets("Лист2").Select
Range("A30:D30").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Worksheets("Лист1").Select
Range("A36:D36").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Worksheets("Лист2").Select
Range("A35:D35").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Worksheets("Лист2").Activate
txtN3.ControlSource = "b25"
txtN2.ControlSource = "c25"
txtN1.ControlSource = "d25"
Worksheets("Лист1").Activate
txtRes1.ControlSource = "d10"
txtRes2.ControlSource = "c10"
txtRes3.ControlSource = "b10"
Range("B16:C17").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Worksheets("Лист2").Select
Range("B15:C16").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False

```

## Додаток Т (продовження)

```

Range("B15").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("B47").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Range("C16").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("B46").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("Лист2").Select
Range("B25").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("B50").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Range("C25").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("B49").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Range("D25").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("B48").Select
Selection.PasteSpecial
Paste:=xlValues,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Range("B41").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=Лист1!R[-22]C[2]/60" Calculate
Worksheets("Лист1").Activate
End Sub
Private Sub CommandButton6_Click()
Worksheets("Лист4").Activate
Range("F11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLOpen()"
Calculate
Worksheets("Лист2").Activate
Range("A62").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLPutMatrix(""daniexcel"",R[-
22]C[1]:R[-12]C[1])"
Calculate
Range("A63").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString(""E=daniexcel(1),Q_
max=daniexcel(2),tc=daniexcel(3),t
vg=daniexcel(4),Pvg=daniexcel(5),P
vux=daniexcel(6),Cg=daniexcel(7),C
e=daniexcel(8),N1=daniexcel(9),N2=
daniexcel(10),N3=daniexcel(11)"")"
Calculate
Range("A64").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString(""cd
c:\T_DP\Optim_G"")"
Calculate
Range("A65").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString(""Optum_G1"")"
Calculate
Range("A66").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLGetMatrix(""danimatlab"", "B70
")"
Calculate
Range("C71").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-
1]*3000/100" Calculate
Range("C72").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-
1]*3500/100" Calculate
Range("C73").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RC[-
1]*6000/100" Calculate
Worksheets("Лист2").Activate
txtTg1.ControlSource = "b74"
txtTg2.ControlSource = "b75"
txtTg3.ControlSource = "b76"
txtTp1.ControlSource = "b77"
txtTp2.ControlSource = "b78"
txtGp3.ControlSource = "b82"
txtGp1.ControlSource = "b80"
txtGp2.ControlSource = "b81"
txtQ1.ControlSource = "b83"
txtQ3.ControlSource = "b85"
txtQ2.ControlSource = "b84"
txtQ.ControlSource = "b86"
txtx1.ControlSource = "b71"
txtx2.ControlSource = "b72"
txtx3.ControlSource = "b73"
txtO1.ControlSource = "c71"
txtO2.ControlSource = "c72"
txtO3.ControlSource = "c73"

```

### Додаток Т (продовження)

```

End Sub
Private Sub UserForm_Activate()
Worksheets("Лист1").Activate
txtZadoper.ControlSource = "d19"
txtCe.ControlSource = "b16"
txtCg.ControlSource = "c17"
txtPatm.Value = "?"
Worksheets("Лист2").Activate
txttc.ControlSource = "b42"
txtpvg.ControlSource = "b44"
txtpvux.ControlSource = "b45"
txttvg.ControlSource = "b43"
Worksheets("Лист1").Activate
txtRes3.ControlSource = "b10"
txtRes2.ControlSource = "c10"
txtRes1.ControlSource = "d10"
Worksheets("Лист2").Activate
txtO1.ControlSource = "c71"
txtO2.ControlSource = "c72"
txtO3.ControlSource = "c73"
End Sub

Private Declare Function
FindWindow Lib "user32" Alias
"FindWindowA" (ByVal lpclassName
As String, ByVal lpwindowname As
String) As Long
Private Declare Function
SendMessage Lib "user32" Alias
"SendMessageA" (ByVal hwnd As
Long, ByVal wmsg As Long, ByVal
wparam As Long, lparam As Any) As
Long
Private Declare Function
PostMessage Lib "user32" Alias
"PostMessageA" (ByVal hwnd As
Long, ByVal wmsg As Long, ByVal
wparam As Long, ByVal lparam As
Long) As Long
Private Declare Function
ShowWindow Lib "user32" (ByVal
hwnd As Long, ByVal ncmdshow As
Long) As Long
Private Sub CommandButton1_Click()
Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLOpen()"
Calculate
ActiveSheet.Shapes("Object
5").Select
Selection.Verb
Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString("cd c:\T_DP\Z")"
Calculate
Range("C13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString("MGVA_Tout")"
Calculate
Range("C14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString("MGVA_Tv ")"
Calculate
Range("C15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString("MGVA_Q ")"
Calculate
Range("C16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLEvalString("MGVA_qQ ")"
Calculate
sWindowName =
"Figure No. 1"
Range("D17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 =
"=MLClose()"
Calculate
End Sub

```

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сеницын С. Н. Расчет режимов работы компрессорных станций магистральных газопроводов на ЭВМ / С. Н. Сеницын, М. Г. Сухарев, Е. В. Леонтьев // Газовая промышленность. – 1966. - № 12. - С. 17-19.
2. Сеницын С. Н. Применение вычислительных машин для гидравлических расчетов магистрального газопровода / Сеницын С. Н., Сухарев М. Г., Леонтьев Е. В. - Тр. ВНИИГаз. “Транспорт природного газа”. – 1967. – С. 12-15.
3. Крутов В.Н. Теплотехника / Крутов В.Н.–М.: Машиностроение,1986.–432 с.
4. Rachford H. H. Optimizing Pipeline Control in Transient Gas Flow / H. H. Rachford, R. G. Carter // Pipeline Simulation Interest Group : annual conference, 18 – 20 october, 2000. – Savannah, Georgia, USA. – P. 45 – 48.
5. Копилов В. А. Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України / В. А. Копилов // Нафта і газ України. Збірник наукових праць. Матеріали 6-ої Міжнародної наукової конференції, 31 жовтня – 3 листопада, 2000 р. – Івано-Франківськ, 2007. – Т. 1. – С. 9 – 14.
6. Берман Р. Я. Автоматизация систем управления магистральными газопроводами / Р. Я. Берман, В. С. Паркратов. – Л. : Недра, 1978. – 159 с.
7. Берман Р. Я. Расчет режимов работы закольцованой системы газопроводов на ЭВМ / Берман Р. Я., Бобровский С. А., Галиуллин З. Т. // Газовая промышленность. – 1966. - № 12. - С. 14 – 16.
8. Берман Р. Я. Инженерные расчёты сложных газотранспортных систем на ЭЦВМ / Берман Р. Я. // Автоматизация, Телемеханизация и связь в газовой промышленности. – 1969. - № 4. – С. 15 – 21.
9. Александров А. В. Выбор оптимального режима эксплуатации сложной системы дальнего транспорта газа с применением ЭВМ / Александров А. В., Берман Р. Я., Яковлев Е. И. - М. : ВНИИЭгазпром, 1970. – 100 с.
10. Александров А. В. Аналитические зависимости степени сжатия и мощности компрессорной станции от ее пропускной способности / Александров А.В. - Газовая промышленность. – 1965. - № 2. – С. 47 – 50.

11. Панкратов В. С. Разработка и эксплуатация АСУ газотранспортными системами / В. С. Панкратов, Р. Я. Берман. – Л. : Недра, 1982. – 256 с.
12. Комягин А. Ф. Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП газонефтепроводов. Учебник для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп / А. Ф. Комягин – М.: Недра, 1983.- 376 с.
13. Овсецин И. С. Система антипомпажного регулирования центробежных нагнетателей с электроприводом / И. С. Овсецин, А. О. Комягин // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный сборник. – М. : ВНИИЭГАЗПРОМ, 1972. – Вып. 7. – С. 9 – 17.
14. Шнеэ Я. И. Газовые турбины. Термодинамические процессы и теплообмен в конструкциях/Шнеэ Я.И., Капинос В.М., Котляр И.В.–К.:Вища школа, 1976.–296 с.
15. Арсеньев Л. В. Газотурбинные установки. Конструкции и расчет: Справочное пособие / Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырыжкин. – Л. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
16. Немудрое А. Г. Расчет режимов работы газопроводов методом определения оптимальных характеристик турбонагнетателей / А. Г. Немудрое, В. И. Черникш. - Газовая промышленность. – 1966. - № 3. - С. 31—33.
17. Темпель Ф. Г. Оптимальные параметры технологического процесса транспорта газа для эксплуатирующейся трубопроводной системы / Ф. Г. Темпель, В. М. Маслов. – Л. : Недра, 1970. – 128 с.
18. Альбом приведенных характеристик нагнетателей Невского машиностроительного завода им. В.И. Ленина. – М. : ВНИИгаз, 1964. – 63 с.
19. Биков Г. О. Математична модель роботи відцентрового нагнітача на нерозрахункових режимах / Г. О. Биков // Нафтова і газова промисловість. – 2003. - № 3. – С. 27 – 29.
20. Коток В. Б. Моделювання оптимальних режимів роботи багатоцехової компресорної станції / В. Б. Коток, А. Д. Тевяшев, О. А. Тевяшева // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. - № 2 (11). – С. 89 – 96.
21. Сухарев М. Г. Технологический расчет и обеспечение надежности газо - и нефтепроводов / М. Г. Сухарев, А. М. Карасевич. – М. : ГУП Издательство Нефть и Газ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. – 272 с.

22. Горбійчук М.І. Діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, О. А. Скріпка // Нафтова і газова промисловість. – 2006. - № 2. – С. 36 – 38.
23. Ковалів Є. О. Оптимальне керування роботою багатощаблевих компресорних станцій з різними типами приводів: дис. канд. тех. наук: 05.13.07 / Ковалів Євстахій Осипович. — Івано-Франківськ, 2004. — 220 с.
24. Горбійчук М. І. Математична модель нагнітача / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2005. – №1. – С. 7 – 9.
25. Osiadacz A. J. Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models / A. J. Osiadacz, M.Chaczykowski // Chemical Engineering Journal. – 2001 - №81. – P. 41-51.
26. Газопроводы подземные магистральные, Гидравлический расчёт при стационарном режиме. Нормы технологического проектирования. ВСН-51-2-79. М., 1979 (Мингазпром). – 15 с.
27. Белоусов В. Д. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Белоусов В. Д. – М. : Недра, 1978. – 407 с.
28. Горбійчук М.І. Імітаційне моделювання роботи компресорної станції з прилеглими трубопроводами / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук // Автоматика – 2006 : 13 Міжнародна конференція по автоматичному управлінню. Вінниця, 25-28 вересня 2006 р. – Вінниця, 2006. – С. 250.
29. Горбійчук М.І. Імітаційне моделювання динаміки компресорної станції з прилеглими трубопроводами / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук, І. М. Марчук // Східно-Європейський журнал передових технологій.–2007.–№ 6/5(30). – С.7 – 11.
30. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Цыпкин Я.З. – М. : Наука, 1966. – 400 с.
31. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления / Саридис Дж.; Пер.с англ. - М. : Наука, 1980. – 400 с.
32. Загоринский Э. Б. Оптимизация режима работы магистрального газопровода по двум критериям / Э. Б. Загоринский, В.Н. Шустеф // Транспорт и хранение газа. – 1978. - № 7. – С. 36 – 46.

33. Гарляускас А. И. Оптимизация режимов газотранспортных систем по двум критериям / А. И. Гарляускас // Транспорт и хранение газа. Реф. сб. ВНИИЭГАЗПРОМА. – 1973. - № 3. – С. 17 – 23.
34. Централизованный контроль и оптимальное управление на магистральных газопроводах / [Сергованцев В. Т., Кучин Б. Л., Гарляускас А. И., Тихомиров Е. Н.]. – Л. : Недра, 1973. – 328 с.
35. Гарляускас А. И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа / Гарляускас А. И. - М. : Недра, 1975. – 155 с.
36. Загоринский Э. Е. Энергетический метод определения режима работ многоцеховой компрессорной станции / Э. Е. Загоринский // Транспорт, хранение и использование газа в народном хозяйстве. Экспр. Информ. ВНИИЭГАЗПРОМА. – 1976. - № 21. – С. 3 – 4.
37. Джигит Г. А. Оптимизация режимов работы компрессорных станций / Г. А. Джигит // Газовая промышленность. – 1974. - № 5. – С. 22.
38. Матевосян П. А. Вычислительное устройство для оперативного оптимального распределения нагрузок между параллельно работающими нагнетателями компрессорной станции / П. А. Матевосян, М. А. Бабаджанова, Р. Л. Арутюнян // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный сборник. – М. : ВНИИЭГАЗПРОМ. - 1974. - № 4. - С. 9 – 12.
39. Оптимизация и безопасность работы компрессорных цехов / Газовая промышленность. – 1998. - № 12. - С. 18 – 20.
40. Центробежные нагнетатели для ГПА многониточных газотранспортных систем / Газовая промышленность. - 1998. - № 12. – С. 36 – 38.
41. Никитин В. И. Использование разнотипных газоперекачивающих агрегатов на КС / В. И. Никитин // Газовая промышленность – 1993. - № 2. – С. 28 – 30.
42. Семимжанов Э. С. Метод динамического программирования в управлении транспортом газа / Э. С. Семимжанов, А. П. Гарляускас // Газовая промышленность. – 1966. - № 12. – С. 15 – 17.



43. Мисарек Д. Турбокомпрессоры/Мисарек Д. - М.: Машиностроение, 1968.-234с.
44. Дубинский А. В. Агрегированное описание групп электроприводных ГПА в АСУТП транспорта газа. / А. В. Дубинский, Н. В. Вольвовский // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный научно-техн. сборник. – М. : ВНИИОЭНГ, 1983. – Вып. 3. – С. 13 – 14.
45. Brown R. Custom Optimisation Program used by Dispatchers / Brown R., P. Chui // Pipeline Simulation Interest Group : annual conference, 23-25 october, 1996. – San Francisco, USA. – P. 43 – 45.
46. Graham J. T. On-line Modeling, a Diamond in the Rough / Graham J. T., V. J. Wukovits, J. D. Yurchevich // Pipeline Simulation Interest Group : annual conference, 23-25 october, 1996. – San Francisco, USA. – P. 46 – 49.
47. Revell N. J. An Overview of the Gas Transmission System in Great Britain - Operating Challenges and Modelling Solutions / Revell N. J., M. G. Thorne // Pipeline Simulation Interest Group, annual conference, 28 – 30 october, 1998. - Denver, Colorado, USA. – P. 25 – 28.
48. Wheeler M. L. Automating Predictive Model Runs for Gas Control / Wheeler M. L., R. S. Whaley // Pipeline Simulation Interest Group, Annual Conference, 17-19 october, 2001. – Salt Lake City, Utah, USA. – P. 36 – 38.
49. Shaw H. C. On-line Simulations for the Gas Controller / Shaw H. C., M. L. Wheeler, R. S. Whaley // Pipeline Simulation Interest Group, Annual Conference, 15-17 october, 1997, Tuscon, Arizona, USA. – P. 56 – 59.
50. Bryant M. Advanced application enhances operation for US Gulf Coast gas pipeline/ Bryant M., R. L. Varo'n // Oil and Gas Journal. - February 25, 2002. - P. 64 – 71.
51. Sandercock W. G. Union Gas applies expert system to optimize pipeline/ Sandercock W. G. // Pipeline Industry. – September, 1994. – Vol. 77. – P. 37 – 47.
52. Johnson A. T. Integrating an Expert System and Pipeline Simulator to Enhance Gas Pipeline Operation, Profitability and Safety / Johnson A. T., B. D. Marquart, M. L. Istre, R. K. Walloopillai // Pipeline Simulation Interest Group : annual conference, 18 – 20 october, 2000. – Savannah, Georgia, USA. – P. 55 – 58.

53. Uraikul V. Development of an expert system for optimizing natural gas pipeline operations / Uraikul V., C. W. Chan, Tontiwachwuthikul // *Expert Systems with Applications*. – 2000. - Vol. 18. – P. 271 – 282.
54. Carter R. G. Pipeline Optimisation: Dynamic Programming after 30 years, / Carter R. G. // *Pipeline Simulation Interest Group, annual conference, 28 – 30 october, 1998.* - Denver, Colorado, USA. – P. 29 – 33.
55. Wright S. Compressor Station Optimisation / Wright S., M. Somani, C. Ditzel // *Pipeline Simulation Interest Group, annual conference, 28 – 30 october, 1998.* - Denver, Colorado, USA. – P. 34 – 39.
56. Carter R. G. Compressor Station Optimisation: Computational Accuracy and Speed Rough / Carter R. G. // *Pipeline Simulation Interest Group : annual conference, 23-25 october, 1996.* – San Francisco, USA. – P. 56 – 59.
57. Poe W. Gas pipeline optimisation and control/Poe W., U. Basu, G. Venkataramanan, P.Ferber//*Hydrocarbon Engineering*.–1999.–Vol.4,no.10.- P. 81 – 85.
58. Suming Wu. Model Relaxations for the Fuel Cost Minimization of Steady-State Gas Pipeline Networks / Suming Wu, R. Z. Rios-Mercado, E. A. Boyd, L. R. Scott // *Mathematical and Computer Modelling*. – 2000. – 31. – P. 197 – 220.
59. Krishnaswami P. Compressor Station Optimization for Linepack Maintenance [Электронный ресурс] / Krishnaswami P., Chapman K.S., Abbaspour M. // *PSIG Annual Meeting held in Palm Springs, California, 20 – 22 October 2004.* – Режим доступа : <http://www.mne.ksu.edu/people/faculty/krishnaswami>.
60. Carter R. G. Optimizing Line-Pack Management to Hedge against Future Load Uncertainty [Электронный ресурс] / Carter R. G., Rachford H. H. // *35th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), 15-17 Oct., - 2003.* - Bern, Switzerland. – Режим доступа : <http://www.psig.org/papers/2000/0306.pdf>.
61. Phil Ferber Gas Pipeline Optimization [Электронный ресурс] / Phil Ferber, Ujjal Basu, Ganesh Venkataramanan, Mary Goodreau, Peter Linden. – Режим доступа : <http://www.psig.org/papers/1990/9905.pdf>.
62. Luongo C.A. Optimizing the Operation of Gas Transmission Networks [Электронный ресурс] / Luongo C.A., Yeung W.C., Gilmour B.J. // *ASME*

- International Computers in Engineering Conference, Santa Clara, CA, August 1991. –  
Режим доступа : <http://www.psig.org/papers/1990/9405.pdf>.
63. Anders T. Integrating an Expert System and Pipeline Simulator to Enhance Gas Pipeline Operation, Profitability and Safety / Anders T. Johnson, Brent D. Marquart, Michael L. Istre, Ram K. Walloopillai // Pipeline Simulation Interest Group : annual conference, 18 – 20 october, 2000. – Savannah, Georgia, USA. – P. 73 – 75.
64. Johnson A. A Practical Approach to the Application of an Expert System to Gas Pipeline Operation and Data Integrity / Johnson A. // P.S.I.G., Thirty-First Annual Meeting, Oct. 1999. - P. 32 – 33.
65. Diana Cobos-Zaleta Roger Z. Ríos-Mercado. A MINLP Model for a Minimizing Fuel Consumption on Natural Gas Pipeline Networks [Электронный ресурс] / Diana Cobos-Zaleta Roger Z. Ríos-Mercado // Memorias del XI Congreso Latino Iberoamericano de Investigación de Operaciones (CLAIO) 27 – 31 de Octubre de 2002 Concepción, Chile. –Режим доступа: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=113>.
66. Efficient use of fuel gas in compressors [Электронный ресурс] / Module 8 of 17, Rev Date 27/05/2008.–37p.- Режим доступа: <http://www.capp.ca/raw.asp?x=PDF&dn>.
67. Nguyen H. H. A comparison of automation techniques for optimization of compressor scheduling / H.H. Nguyen, V. Uraikul, C.W. Chan, P. Tontiwachwuthikul // Advances in Engineering Software. – 2008. – Vol. 39. – P. 178 – 188.
68. Sun C.K. An integrated expert system/operation research approach for the optimization of natural gas pipeline operations / Sun C.K., Uraikul V., Chan CW., Tontiwachwuthikul P. // Eng Appl Artif Intell. – 2000. – Vol.13. – P. 465–75.
69. Uraikul V. Development of an expert system for optimizing natural gas pipeline operations / Uraikul V., Chan CW., Tontiwachwuthikul P // Expert Syst Appl. – 2000. – Vol.18. – P. 271–82.
70. Hanh H. Nguyen Applications of artificial intelligence for optimization of compressor scheduling / Hanh H. Nguyen, Christine W. Chan // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2006. – Vol.19. – P. 113–126.

71. B. Fahimnia Genetic Algorithm Optimization of Fuel Consumption in Compressor Stations / B. Fahimnia, R. Molaei, M. Ebrahimi // Wseas transaction on systems and control. – 2008. – Vol. 3. - P. 1–10.
72. Chapman K.S. Non-isothermal Compressor Station Transient Modeling [Электронний ресурс] / Chapman K.S., Abbaspour M. // PSIG conference, 2003. – 10 p. - Режим доступу : <http://www.psig.org/papers/2000/03A3.pdf>.
73. Philip P. Walsh Gas turbine performance / Philip P. Walsh, Paul Fletcher. - Blackwell science, 2004. – 646 p.
74. Jeff Stoffregen Pipeline Network Optimization – Application of Genetic Algorithm Methodologies / Jeff Stoffregen, Kamal K. Botros, Daniel J. Sennhauser, Krystyna Jungowsk, Hossein Golshan // SIG Annual Meeting held in San Antonio, Texas, 7 – 9 November, 2005. – P. 1 – 24.
75. Botros K.K. Effects of Dynamic Penalty Parameters on the Conversion of MOGA in Optimization of a Large Gas Pipeline Network / Botros K.K., Sennhauser D.J., Jungowski K., Poissant G., Golshan H., Stoffregen J. // 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Albany, New York, Aug 30 – 1 September, 2004. – P. 46 – 47.
76. Christian Kelling A Practical Approach to Transient Optimization for Gas Networks [Электронний ресурс] / Christian Kelling, Klaus Reith, Erwin Sekirnjak. - 2000. – 22 p. - Режим доступу : <http://www.psig.org/papers/2000/0005.pdf>.
77. SIMONE 5.0 Benutzerhandbuch [Электронний ресурс] / LIWACOM Informationstechnik GmbH, Essen; SIMONE Research Group. - Режим доступу : <http://www.simone.eu/simone-company-about.asp>.
78. Слоботчиков К.Ю. Математическое и информационное обеспечение системы управления компрессорного цеха газоперекачивающих агрегатов / К. Ю. Слоботчиков//Автоматизация в промышленности ИПУ РАН.–2004.-№7.-С. 43- 45.
79. Оптимізація режиму роботи компресорного цеху за допомогою програмно-технічних засобів / І. А. Гордієнко, П. Г. Дудко, В. Г. Старовойтов [та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2002. - №6. – С. 56 – 58.

80. Визначення оптимального режиму роботи компресорного цеху при паралельному включенні ГПА / В.М. Беккер, В.В. Гулічев, В.І. Мелешко [та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2005. - №2. – С. 45 – 48.
81. Лещенко І.Ч. Постановка задачі оптимізації режимів роботи цехів компресорних станцій магістральних газопроводів / Лещенко І.Ч. // Проблеми загальної енергетики. – 2006. - № 13. – С. 67.
82. Олейниченко А. В. Анализ эксплуатации агрегатов ГПА Ц-16 с системой регулирования фирмы "ССС" / А. В. Олейниченко // Газовая промышленность. – 1996. - № 5. – С. 7 – 8.
83. Микаэлян Э. А. Техническое обслуживание энерготехнологического оборудования, газотурбинных газоперекачивающих агрегатов системы сбора и транспорта газа. Методология, исследования, анализ и практика / Микаэлян Э. А. — М. : Топливо и энергетика, 2000. – 314 с.
84. Микаэлян Э. А. Повышение качества, обеспечение надежности и безопасности магистральных газонефтепроводов для совершенствования эксплуатационной пригодности / Микаэлян Э. А. – М. : Топливо и энергетика, 2001. – 640 с. – (Серия: Устойчивая энергетика и общество. Под редакцией профессора Г.Д. Маргулова).
85. Максименко С. В. Методы и средства технической диагностики оборудования компрессорной станции. Обзорная информ / Максименко С. В., Поляков Г. Н., Труфанов А. Н. – М. : ВНИИЭгазпром, 1990. – 66 с. – (Серия "Транспорт и подземное хранение газа").
86. Рахмилевич З. З. Компрессорные установки / Рахмилевич З. З. - М. : Химия, 1989. – 272 с.
87. Зарицкий С. П. Диагностическое обслуживание оборудования КС / Зарицкий С. П. - М.: ИРЦ "Газпром", 2000. – 156 с. – (Обз. инф. Серия "Газовая промышленность на рубеже XXI века").
88. Орбис-Дияс В.С. Нагнетатели газа: опыт применения / Орбис-Дияс В.С., Адамова М., Пальчиков С. // Аква-Терм. - 2005. - № 1. - С. 18-19.

89. Пластинин П. И. Автоматизированная система измерений, накопления и обработки данных при испытаниях поршневых компрессоров / П. И. Пластинин, Т. С. Дегтярева, В. А. Светлов, А. В. Сячинов // Компрессорная техника и пневматика. - 1997. – вып.3-4 (16-17). – С. 12 – 14.
90. Ястребова Н.А. Техническая диагностика и ремонт компрессоров / Ястребова Н.А. - М. : ЦНИИТЭхимнефтемаш, 1991 - Ч. 2. – 60 с.
91. Матвеевский Б. Р. Приборное обеспечение для трибодиагностики узлов трения в процессе эксплуатации / Матвеевский Б. Р. - М. : ИРЦ "Газпром", 1995. - С. 344 - 346. – ( Сб. трудов Первой международной конф. "Энергодиагностика", Москва, сентябрь 1995г. - Т. 3: Трибология).
92. Семенов А.С. Идентификация неисправностей газоперекачивающих агрегатов за функциональными признаками / [Семенов А. С., Иванов В. А., Кузьмин С. В., Гимадудинов А. Р.]. - Тюмень: ТЮМГНГУ, 2004. С. 69-74. - // Сб. науч. тр. «Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта».
93. Крицкий М.В. Нетрадиционные методы диагностирования технического состояния ГПА. Материалы XI региональной научно-технической конференции «Вузовская наука Северо-кавказского региона». Т.1. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. - Ставрополь: Севкавгту, 2007.- 278 с.
94. Костарева С. Н. Совершенствование методов диагностирования технического состояния газоперекачивающих агрегатов на основе данных производственного мониторинга: автореф. дис. на соискание науч. степ. канд. техн. наук : спец. 25.00.16 „Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ” / С. Н. Костарева — Уфа, 2004. — 20 с.
95. Микони С. В. Реализация принципов эргономичности и интеллектуальности в системе СВИРЬ / С. В. Микони, Д. П. Бураков, М. И. Сорокина // Программные продукты и системы. – 2002. - № 3. – С. 28 – 31.
96. Перегудов Ф. И. Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.
97. Микони С. В. Методы мягкого выбора / С. В. Микони // Тр. конф. КИИ-2000, – М. : Изд-во Физматлит, 2000. – Т. 2. – С. 222–225.

98. Козаков В.С. Современные методы диагностирования показателей надежности и экологической безопасности при эксплуатации энерготехнологического оборудования / В. С. Козаков, Т. В. Кліменко // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 3(19). – С. 26-31.
99. Кудашов Э.Р. Разработка прогрессивных методов оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов: автореф. дис. на соискание науч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – „Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовой отрасли)” / Кудашов Э.Р. — Тюмень, 2005. — 24 с.
100. Сула А. С. Информационный микроскоп "Диаграф" - новый инструмент для технической диагностики / А. С. Сула, Э. А. Каравашкин. - НТС Газовая промышленность. Серия: Диагностика оборудования и трубопроводов, 1997. - №2. - С. 13 – 25.
101. Cen Nan Real-time fault diagnosis using knowledge-based expert system, process safety and environmental protection / Cen Nan. – 2008. - Vol. 86. – P. 55–71.
102. Zhang J. Improved on-line process fault diagnosis through information fusion in multiple neural networks/Zhang J.//Comput Chem Eng–2006.–Vol.30(3). – P. 558–571.
103. Zadeh L.A. Fuzzy logic/Zadeh L.A.//IEEE Comput.-1998.–Vol.21(4). – P. 83 – 93.
104. Nan C. Modeling and simulating a micro steam power unit using G2 real-time expert system / Nan C., Iqbal M.T., Khan F.I. // Presented at IEEE NECEC 2006, St. Johns, Newfoundland, Canada. – 2006. – P. 15 – 25.
105. Рис В. Ф. Центробежные компрессорные машины / Рис В.Ф. – М. – Л. : Машиностроение, 1964. – 336 с.
106. Ткаченко И.Е. Способы изменения производительности электроприводных компрессорных станций/И.Е. Ткаченко, Ю.А. Трейко// Реф.инф. ВНИИЭгазпрома. Серия: Транспорт и хранение газа. – 1983. – Вып. 3. – С. 22 – 24.
107. Степанов А.И. Центробежные и осевые компрессоры, воздуходувки и вентиляторы. Теория, конструкции и применение / Степанов А.И. – М.: Машиздат. – 1960. – 347 с.
108. Никишин В.И. Диалоговая система обработки диспетчерской информации на

- ЭВМ / В.И. Никишин, В.С. Панкратов, Р.Я. Берман // Газовая промышленность. - 1986. - № 11. - С. 38 – 39.
109. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Бендат Дж., Пирсол А. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
110. Горбійчук М. І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості/Горбійчук М.І.–Івано-Франківськ: Факел,1999.–Ч.1–150 с.
111. Доброхотов В.В. Центробежные нагнетатели природного газа / Доброхотов В. В. – М. : Недра, 1972. – 128 с.
112. Сухарев М. Г. Оптимизация систем транспорта газа / М. Г.Сухарев, Е. Р. Ставровский. – М. : Недра, 1975. – 277 с.
113. Сухарев М.Г. Оптимальное развитие систем газоснабжения / Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских В.Е. – М. : Недра, 1981. – 294 с.
114. Пістун Є. Розробка методики розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу для задач його обліку / Є. Пістун, Ф. Матійко // Нафта і газ України. Матеріали 6-ої Міжнародної науково-практичної конференції. – Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – Том 3. – С. 211 – 213.
115. Иванов В.А. Основные принципы технического диагностирования и определения остаточного ресурса оборудования нефтегазовых объектов: Учебное пособие / Иванов В.А., Семенов А.С., Гимадутдинов А.Р. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – 50с.
116. Кунина П.С. Анализ взаимодействий оборудования компрессорной станции как сложной технической системы / Кунина П.С., Фик А.С. // Современные проблемы науки и образования . – 2007. - №5. – С. 50 – 54.
117. Компресорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів : СОУ 60.3-30019801-011:2004. - [Чинний від 22.12.2004]. – К. : ДК Укртрансгаз. – 117 с. – (Стандарт організації України).
118. Методика вибродіагностики технічного стану газоперекачуючих агрегатів ГПА-10 і ГПА-10-01 в умовах експлуатації на компресорних станціях газової промисловості. – Київ, 1995. – 20 с.



119. Нормы вибрации. Оценка интенсивности вибрации газоперекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации на компрессорных станциях министерства газовой промышленности. – Москва, 1985. – 20 с.
120. Жуков Р. В. Обзор некоторых стандартов в области диагностики машинного оборудования / Р. В. Жуков // Контроль. Диагностика. – 2004. - № 12. – С. 61 – 66.
121. Орлов І. О. Діагностування технічного стану КУ за накопиченням в оливі продуктів спрацювання / І. О. Орлов // Нафтова і газова промисловість. – 2003. - №3. – С. 48 – 50.
122. Трубопровідний транспорт газу / [М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків та ін.] ; за редакцією М. П. Ковалка. – К. : Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.
123. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
124. Жернаков С. В. Интеллектуальные средо-ориентированные системы моделирования испытаний авиационных ГТД на базе гибридных экспертных оболочек / Жернаков С.В., Молотков Е.Г., Юлдыбаев Л.Х. // Межвуз. научн. сб. “Испытания авиационных двигателей”. — Уфа: УГАТУ, 1997. – С. 119-126.
125. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTECH / Леоненков А. – М. : Издательская группа BHV, 2005. – 706 с.
126. Ротштейн А. П. Медицинская диагностика на нечеткой логике / Ротштейн А. П. — Винница: Континент—ПРИМ, 1996. — 132 с.
127. Ротштейн А. П. Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний / А. П. Ротштейн, Д. И. Кательников // Кибернетика и системный анализ. —1998. — №5. — С. 53-61.
128. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А. П. — Винница: УНІВЕРСУМ—Вінниця, 1999. — 320 с.
129. Ротштейн О. П. Soft Computing в біології: багатофакторний аналіз і діагностика: Монографія / Ротштейн О. П., Ларюшкін Є. П., Мітюшкін Ю. І. — Винница: УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2008. — 144 с.

130. Кательников Д.І. Розробка методу ідентифікації нелінійних об'єктів для прийняття рішень на базі нечіткої логіки: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.13.07 „Автоматизація технологічних процесів”/ НВК «Київський інститут автоматики». - К., 1998. - 16 с.
131. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации / Цыпкин Я. З. – М.: Наука. — 1984. — 320 с.
132. Gen M. Genetic Algorithms and Engineering Design / Gen M., Cheng R.. – John Wiley & Sons, 1997. – 352 p.
133. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. - Кн.1.: Пер. с англ. — М.: Мир. — 1986. — 320 с.
134. Горбійчук М.І. Метод ранжування газоперекачувальних агрегатів природного газу за їх технічним станом / Горбійчук М.І., Когутяк М.І., Заячук Я.І. // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №1 (6). – С. 131-136.
135. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы/ Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. – М.: Горячая линия, 2004. – 452 с.
136. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / Гостев В. И. – К. : Радиоаматор, 2003. – 510 с.
137. Ефремова З.А., Кузьмина Л.И. Средства автоматизации конторских работ за рубежом// Средства вычислительной техники и оргтехники. –М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1986. -№9. –С.1-16.
138. Байковский В.М., Дризовский Л.М., Меньшикова Л.А. Новые средства вычислительной техники за рубежом // Средства вычислительной техники и оргтехники.-М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1986. -№3. - С. 1-12.
139. Программы управления технологическими процессами // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. - М.: ВНИИЭгазпром, 1988. -№4. –С. 95.
140. Информационно-управляющая система// Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. - М.: ВНИИЭгазпром, 1988. -№6. –С. 83.
141. Семенцов Г. Н. Метод вибору кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F– перетворенні параметрів і показників процесу буріння свердловин /

Семенцов Г. Н., Фадеева О. В. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – Ч.1. Т.1. – С. 30 – 35.

142. Акіменко В.В. Проектування СППР на основі нечіткої логіки. Навчально-методичний посібник / В.В. Акіменко, Ю.В. Загородній. – К.: Видавництво КНУ, 2007. – 94с.

143. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами / Штовба С.Д. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

144. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу компримування газу/М.І. Горбійчук, Я.І. Заячук//Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики: Всеукраїнська наукова конференція. Львів, 21-23 вересня 2004 р. – Львів, 2004. – С. 51.

145. Горбійчук М.І. Математичне моделювання процесу компримування природного газу / Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. - № 3 (8). – С. 21 – 26.

146. Горбійчук М.І. Оптимізація технологічного режиму компримування природного газу / Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. // Нафтова і газова промисловість. – 2003. - № 6. – С. 40 – 42.

147. Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко. – К. : Наукова думка, 1985. – 216 с.

148. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / Ивахненко А. Г. – К. : Наукова думка, 1981. – 296 с.

149. Ивахненко А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А. – К. : Техніка, 1985. – 219 с.

150. Справочник по типовым программам моделирования/[А.Г. Ивахненко, Ю. В. Коппа, В.С. Степашко и др.]; под ред. А. Г. Ивахненко – К.: Техніка, 1980. – 180с.

151. Горбійчук М. І. Індуктивний метод побудови математичних моделей газоперекачувальних агрегатів природного газу / М. І.Горбійчук, Я. І. Заячук // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 5. – С. 32 – 34.

152. Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

153. Зиновьев Г.М. Принципы построения системы защиты многоцеховых КС с газотурбинным приводом центробежных нагнетателей от помпажа / Г. М. Зиновьев, А. Д. Юрьев // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный сборник. – М. : ВНИИОЭНГ, 1981. – Вып. 3. – С. 1 – 9.
154. Михайлов Г.А. Поддержание безпомпажного режима работы газовой компрессорной станции / Михайлов Г.А., Готлибович М.И., Зиновьев Г.М. // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реф. Науч.-техн. сборник. – М. : ВНИИОЭНГ, 1983. – Вып.1. – С. 13 – 15.
155. Дроздов. А.П. Антипомпажная защита и управление многоцеховой компрессорной станцией в Газли / А. П. Дроздов, Ю.А. Грубич, М. Н. Готлибович, Э. М. Стель // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реф сборник. – М. : ВНИИОЭНГ, 1980. – Вып.6. - С. 1 – 7.
156. Горбійчук М. І. Адаптивне керування процесом компримування природного газу / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук // Автоматика-2004: 11 Міжнародна конференція по автоматичному управлінню, Київ, 27-30 вересня 2004 р.– Київ, 2004. – Т.2. – С.11.
157. Горбійчук М. І. Адаптивне керування процесом компримування газу / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук // Збірник наукових праць Всеукраїнської наукової конференції "Мікропроцесорні пристрої та системи в автоматизації виробничих процесів". – Хмельницький, 2004. – С. 13 – 18.
158. Корбут А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн. – М. : Наука, 1969. - 368 с.
159. Константинов Н. М. Математическое моделирование технологических объектов магистральных газопроводов/Константинов Н.М.–М.:Недра,1988.– 192с.
160. Лазарев Ю.Ф. Matlab 5.x/Лазарев Ю.Ф. – К. : Издательська група ВНУ, 2000. – 384 с.

161. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.– М. : Мир, 1985. – 509 с.
162. Горбійчук М.І. Оптимальний розподіл навантаження між відцентровими нагнітачами природного газу з врахуванням їх технічного стану / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, Я. І. Заячук // Наукові вісті. Інститут менеджменту та економіки №1 (11).– Івано-Франківськ, 2007. — С. 131– 136.
163. Економіка підприємства. Збірник практичних задач і конкретних ситуацій: Навч. посібник/ [С.Ф. Покропивний, Г.О. Швиданенко О.С. Федонін та ін.]; За ред. д-ра екон. наук, проф. С.Ф. Покропивного. – К.: КНЕУ, 2000. – 328 с.
164. Горбійчук М. І. Оптимальне керування роботою нагнітачів природного газу із врахуванням технічного стану ГПА / М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – №6/5 (30). – С. 7-11.
165. Горбійчук М.І. Мікропроцесорна система оптимального керування компресорними станціями/М.І. Горбійчук, М.І. Когутяк, Є.О. Ковалів//Вісник технологічного університету Поділля. – 2003. – Том1. Технічні науки. – С. 41 – 44.
166. Заячук Я. І. Адаптивне управління процесом компримування природного газу з врахуванням технічного стану ГПА / Я. І. Заячук // Автоматика-2008: 15 Міжнародна конференція по автоматичному управлінню. Одеса, 23-26 вересня 2008 р. – Одеса, 2008. – С. 786 – 789.
167. Заячук Я.І. Система адаптивного управління процесом компримування природного газу/Я.І. Заячук//Нафтогазова енергетика.–2008.–№3(8).–С.131 – 136.