

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

На правах рукопису



Ковалів Євстахій Осипович

УДК 62-503.57:622.691

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ БАГАТОЦЕХОВИХ
КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів

**Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Науковий керівник:
*доктор технічних наук,
професор Горбійчук М. І.*



d269

Івано-Франківськ

2005

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ СТАНУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СУМІСНОЮ РОБОТОЮ КОМПРЕСОРНИХ ЦЕХІВ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ.....	
	11
1.1 Аналіз критеріїв оцінки ефективності роботи газоперекачуючих агрегатів.....	11
1.1.1 Газотурбінна установка.....	13
1.1.2 Ізотермічне стиснення в компресорі.....	19
1.1.3 Статичний режим ГТУ.....	20
1.2 Математичні моделі ГПА з відцентровими нагнітачами.....	21
1.3 Критерії оптимальності режимів роботи компресорних станцій.....	28
1.4 Аналіз робіт в області оптимального керування компресорними станціями.....	30
1.5 Аналіз стану автоматизації компресорних станцій.....	36
1.6 Обґрунтування і вибір напрямку дослідження.....	40
РОЗДІЛ 2	
ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ОБ'ЄКТІ З МЕТОЮ ЙОГО ІДЕНТИФІКАЦІЇ.....	
	42
2.1 Характеристика багатоцехової КС як об'єкта керування	42
2.2 Проведення промислових досліджень.....	46
2.2.1 Умови експериментальних досліджень.....	46
2.2.2 Визначення основних параметрів газового потоку.....	48
2.2.2.1 Густина газового потоку.....	48
2.2.2.2 Коефіцієнт стисливості газу.....	54
2.2.2.3 Інші параметри газу.....	55
Висновки до розділу.....	55

РОЗДІЛ 3

ЕМПІРИЧНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КОМПРИМУВАННЯ

ГАЗУ.....	57
3.1. Аналіз процесу компримування газу як об'єкта моделювання.....	57
3.2. Обґрунтування та вибір емпіричних моделей процесу компримування газу.....	60
3.3. Вибір методу побудови математичних моделей нагнітача.....	66
3.4. Обробка результатів спостережень та побудова емпіричних моделей нагнітача.....	73
3.5. Дослідження можливостей нейромереж для побудови математичних моделей нагнітачів.....	85
Висновки до розділу.....	94

РОЗДІЛ 4

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПРИМУВАННЯ

ГАЗУ.....	95
4.1. Формалізація задачі оптимального керування	95
4.2. Обмеження в задачі оптимального керування процесом компримування газу.....	99
4.3. Вибір методів розв'язку задач оптимального керування.....	102
4.4. Алгоритмічне та програмне забезпечення задач оптимального керування	108
4.4.1 Розв'язок задачі оптимального керування двома групами працюючих агрегатів	111
4.4.2 Розв'язок задачі оптимального керування трьома групами працюючих агрегатів.....	113
Висновки до розділу.....	116

РОЗДІЛ 5**МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
БАГАТОЦЕХОВИМИ КОМПРЕСОРНИМИ СТАНЦІЯМИ118**

5.1 Структура системи оптимального керування багатоцеховими КС	118
5.2 Апаратне забезпечення АСК.....	119
5.3 Програмне забезпечення системи.....	125
5.3.1 Аналіз програмного забезпечення верхнього рівня системи.....	125
5.3.3 Опис та основні можливості SIMPLICITY.....	127
5.4 Структура спеціального програмного забезпечення.....	134
5.5 Інтегратор оптимізаційної задачі.....	138
5.5.1 Підтримка розв'язку оптимізаційної задачі 1-го етапу.....	142
5.5.2 Підтримка розв'язку оптимізаційної задачі 2-го етапу.....	145
5.5.3 Сезонна адаптація моделей ГПА.....	147
5.5 Розрахунок техніко-технологічних показників роботи ГПА.....	148
Висновки до розділу.....	157
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	159
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	161
ДОДАТКИ.....	169
ДОДАТОК А	
ПРИКЛАД СЕРТИФІКАТУ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	169
ДОДАТОК Б	
АНАЛІЗ ЗМІНИ ГУСТИНИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ (ГАЗОПРОВІД "СОЮЗ").....	170
ДОДАТОК В	
АНАЛІЗ ФОРМУЛ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА СТИСЛИВОСТІ ГАЗУ.....	174

ДОДАТОК Г

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИТРАТИ ПАЛИВНОГО ГАЗУ ВІД
ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ГПА (НАГНІТАЧ - 2ВВ – 30 КС – 21
"СОЮЗ").....177

ДОДАТОК Д

SCRIPT -МНК-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА
(ПРИКЛАД – ВИТРАТА ПАЛИВНОГО ГАЗУ).....187

ДОДАТОК Ж

SCRIPT -ОРТО-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА
(ПРИКЛАД – ПРОДУКТИВНІСТЬ НАГНІТАЧА).....196

ДОДАТОК З

ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ БАГАТОЦЕХОВИХ КС (SCRIPT -
ФАЙЛ)..... 204

ДОДАТОК К

ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ
(SCRIPT - ФАЙЛ).....213

ДОДАТОК Л

ТЕКСТ ПРОГРАМИ –ІНТЕГРАТОРА ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ
ЗАДАЧІ.....222

ДОДАТОК М

АПРОКСИМАЦІЯ ПРИВЕДЕНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАГНІТАЧА РСЛ – 804 – 2.....236

ДОДАТОК Н

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ.....244

ДОДАТОК П

АКТ.....245

ВСТУП

Актуальність теми. Україна має потужну та розвинуту мережу транспортування газу від східних кордонів до країн Центральної та Західної Європи. Через українську газотранспортну систему в 2004 р. було переміщено [1] понад 200 млрд. куб. м. природного газу, в тому числі близько 120,4 млрд. куб. м. це транзит російського газу до європейських країн і Туреччини, що складає понад 90 % від загального обсягу експорту російського газу до цих країн.

Газотранспортна мережа України включає [2] близько 35 тис. км газопроводів, 71 компресорну станцію (КС) загальною потужністю 5,4 млн. кВт. Важливою складовою газотранспортної мережі нашої держави є Управління магістральних газопроводів (УМГ) “Прикарпаттрансгаз”, яке в своєму складі має 18 компресорних станцій (КС) загальною продуктивністю 380×10^6 $\text{м}^3/\text{добу}$.

Однією із вузлових і найпотужніших КС УМГ “Прикарпаттрансгаз” є Богородчанська КС, загальна проектна продуктивність якої майже $8,5 \times 10^6$ $\text{м}^3/\text{год}$. Витрати газу на власні потреби тільки по цій КС складають біля 32×10^3 $\text{м}^3/\text{год}$, а витрати електричної енергії – біля $1,2 \times 10^6$ кВт·год/добу. За цих умов важливого значення набувають питання раціонального використання енергоресурсів, які витрачаються на перекачування газу магістральними газопроводами. Один із шляхів вирішення цієї проблеми є оптимальне керування роботою компресорних станцій. Дослідження показали, що таке керування дає змогу зменшити витрату енергоресурсів на 1,5 – 2 %. А це дасть економію близько 134 грн/год або 2 млн. 797 тис. грн. за рік тільки по Богородчанському лінійному виробничому управлінні магістральних газопроводів (ЛВУМГ) УМГ “Прикарпаттрансгаз”. Тому тема дисертаційної роботи, яка передбачає дослідження в напрямку створення оптимальної системи керування роботою багатоцехових КС з різними типами приводів є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, що викладені в дисертації, зроблені в рамках госпдоговірної роботи № 223/2001 "Система оптимального керування паралельно працюючими компресорними станціями з ГПА з різними приводами" (номер державної

реєстрації – 0105U004900) та держбюджетної роботи "Аналіз і синтез автоматизованих систем керування технологічними процесами буріння, видобутку, транспорту і переробки нафти і газу" (затверджена Науковою Радою ІФНТУНГ 24.09.2001 року, протокол № 5), яка входить в координаційний план "Наукові основи розробки нових технологій видобутку нафти і газу, газопромислового обладнання, поглибленої переробки нафти і газу з метою отримання високоякісних моторних палив, мастильних матеріалів, допоміжних продуктів і нафтохімічної сировини". Вказаний план входить в національну програму "Нафта і газ України".

Мета роботи - створення алгоритмів та програмного забезпечення і на цій основі синтез оптимальної системи керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів для забезпечення економії енергоресурсів (паливного газу та електроенергії).

Відповідно до поставленої мети **задачі дослідження** є такими:

- аналіз задачі оптимального керування процесом компримування природного газу для обґрунтування та вибору напрямку дослідження;
- дослідити ГПА як об'єкт керування для виявлення вхідних та вихідних величин і формування обмежень на технологічні параметри ГПА;
- провести експериментальні дослідження на КС і на цій основі побудувати адекватну процесу компримування природного газу математичну модель;
- формалізувати задачу оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів, розробити методику її розв'язку та синтезувати алгоритми функціонування оптимальної системи процесом компримування природного газу;
- синтезувати оптимальну систему керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів та оцінити її ефективність.

Об'єкти дослідження. Компресорні агрегати з газотурбінними та електричними приводами.

Предмет дослідження. Методи і алгоритми оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів. **Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному, що вперше:

- створені математичні моделі, які включають не тільки технологічні параметри, але й враховують вплив навколишнього середовища на процес компримування газу, що дало можливість підвищити точність моделювання процесу компримування природного газу на 5 – 10 %;
- формалізовано задачу оптимізації, яка включає в себе вартісний критерій оптимальності, обмеження на топологічну структуру багатоцехової КС та на технологічні параметри, що сформовані на базі створених математичних моделей;
- для розв'язку задачі оптимізації процесу компримування газу розроблений метод, який складається з двох етапів – на першому з них визначається кількість працюючих агрегатів (структурна оптимізація), а на другому – частота обертання валу нагнітача з врахуванням обмежень на технологічні параметри (параметрична оптимізація), що дало можливість розробити ефективні алгоритми функціонування оптимальної системи керування і синтезувати систему оптимального керування роботою багатоцехових КС з різними типами приводів ;
- отримані апроксимаційні залежності приведених характеристик ГПА на основі нейромережевого підходу, які є основою алгоритмів розрахунку техніко - технологічних показників роботи ГПА.

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

- на основі створених емпіричних моделей, алгоритмів структурної та параметричної оптимізації розроблена система оптимального керування багатоцеховими компресорними станціями з різними типами приводів, що забезпечує ефективне управління процесом компримування газу на основі вартісного критерію з врахуванням як планового завантаження агрегатів, так і обмежень на технологічні параметри;

- розроблений демонстраційний прототип оптимальної системи керування роботою багатоцеховими компресорними станціями, яка включає в себе програмне забезпечення та штатні засоби автоматизації і яка випробувана в промислових умовах Богородчанської компресорної станції. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 2 млн. 797 тис;

- розроблені рекомендації для ТзОВ НВП "Нова техніка" (м. Львів), які будуть враховані при розробці документації при створенні та модернізації систем автоматизованого керування КС "Богородчани".

Вірогідність результатів. Вірогідність отриманих наукових результатів зумовлена як теоретичними, так і експериментальними дослідженнями, які базуються на ідеї пасивного експерименту, побудові математичних моделей методом найменших квадратів (МНК) і з використанням теорії нейромереж, методів лінійного та нелінійного програмування з широким використанням сучасних програмних продуктів для розв'язку задач оптимізації, а також для синтезу оптимальної системи керування роботою паралельно працюючими ГПА з різними приводами.

Особистий внесок здобувача. Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень, висновки та рекомендації виконані автором самостійно. Автором проаналізовані критерії оцінки ефективності роботи ГПА, математичні моделі відцентрових нагнітачів (ВН) та стан автоматизації компресорних станцій, що дало можливість сформулювати мету і задачі досліджень; проведені експериментальні дослідження в умовах Богородчанської КС з метою отримання емпіричних математичних моделей ГПА; зроблений вибір способу обчислення основних параметрів газового потоку – коефіцієнта стисливості, газової постійної, показника політропи і адіабати; проаналізований ГПА як об'єкт керування та виявлені вхідні і вихідні величини такого об'єкта; створені математичні моделі ГПА з використанням результатів пасивного експерименту; формалізована задача оптимізації та вибраний метод її розв'язку; розроблені алгоритми оптимального керування та їх програмне забезпечення і на цій основі синтезована оптимальна система керування роботою багатоцехових

компресорних станцій з різними типами приводів; перевірено ефективність роботи системи в умовах Богородчанського ЛУМГ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи обговорювались на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького ІФНТУНГ (2002 – 2003 рр.) на наукових семінарах кафедри Автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології; на міжнародній науково-технічній конференції "Нафта і газ України – 2002" (м. Київ, 2002 р.); на ІХ науково-технічній конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (м. Хмельницький, 2002 р.); на 10-ій міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика – 2003" (м. Севастополь, 2003); на 8-ій міжнародній конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС – 2003).

Публікації. Результати роботи висвітлені у 7 статтях, що опубліковані у фахових наукових журналах, у 5 збірниках матеріалів і тез науково-технічних конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, переліку використаних джерел із 79 найменувань та 12 додатків і викладена на 248 сторінках. Робота проілюстрована 40 рисунками, включає 18 таблиць і додатки на 80 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СУМІСНОЮ РОБОТОЮ КОМПРЕСОРНИХ ЦЕХІВ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ

1.1 Аналіз критеріїв оцінки ефективності роботи газоперекачувальних агрегатів

Основним елементом компресорних станцій (КС) є газоперекачувальний агрегат (ГПА).

ГПА функціонально і конструктивно складається із привода і компресора (нагнітача).

Привід нагнітача може бути двох типів: газотурбінна установка (ГТУ) і електропривід (ЕП).

Компресори – це відцентрові нагнітачі (ВН), які приводяться в дію ГТУ або ЕП.

Таким чином, можливі такі варіанти структури ГПА: ГТУ+ВН або ЕП+ВН.

Привід типу ГТУ дає можливість здійснювати зміну продуктивності ВН шляхом зміни частоти його обертання; ЕП теж може мати змінну або незмінну частоту обертання вихідного валу.

КС можуть бути одноцеховими, які мають в своєму складі однотипні ГПА і багатоцеховими з різнотипними ГПА. Цехи КС з'єднані з магістральними газопроводами всмоктуючими і нагнітальними шлейфами, а самі газопроводи можуть бути з'єднані між собою вхідними та вихідними газопроводами - "перемичками".

Компримування газу вважають стаціонарним процесом [3,4] в будь-який момент часу, незважаючи на характер руху газу в прилеглих ділянках. Обґрунтування цього в тому, що процеси компримування мають незначну інерційність в порівнянні з процесами руху газу по трубопроводам.

На рис. 1.1 показана інформаційна модель КС з прилеглими до неї газопроводами [3].

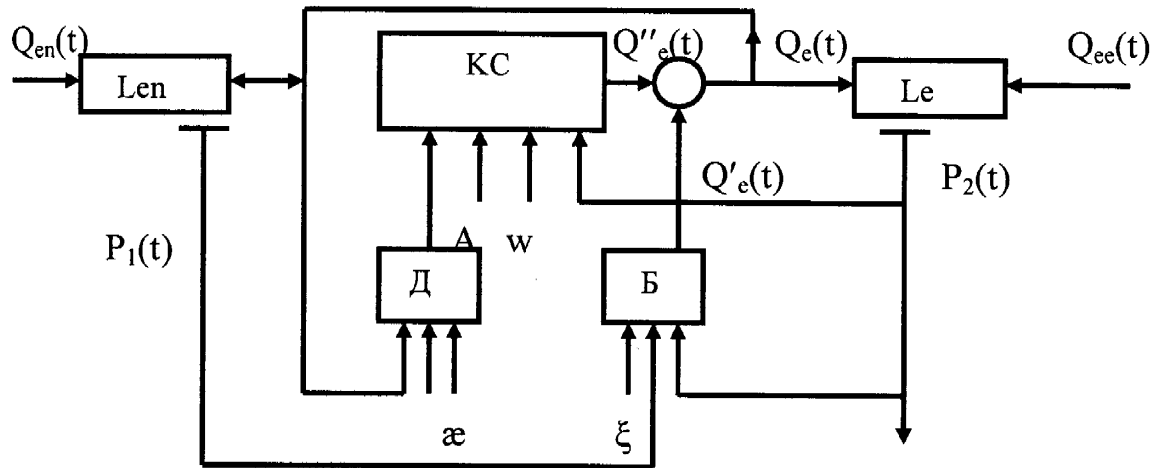


Рисунок 1.1 - Інформаційна модель КС з прилеглими до неї газопроводами

На рисунку прийняті такі позначення:

ξ - степінь відкриття байпаса Б;

α - степінь відкриття дроселя Д;

$Q_e'(t)$ і $Q_e''(t)$ – відповідно продуктивність агрегату і витрата газу через байпасний клапан;

A - кількість ГПА;

w - кутова швидкість ВН;

$P_1(t)$, $P_2(t)$ - тиски в газопроводах – режимні параметри;

$Q_{en}(t)$ - вхідний сигнал (витрати);

$Q_e(t)$, $Q_{ee}(t)$ - вихідний сигнал (витрати);

L_{en} , L_e - довжини прилеглих газопроводів.

Схема найпростішої ГТУ з підводом тепла при постійному тискові показана [5] на рис. 1.2. Компресор 4 заштовхує повітря із атмосфери, стискає до певного тиску і подає в камеру згорання 1. В цю ж камеру поступає і паливо (газ). В камеру згорання повітря і паливо подається неперервно, що і обумовлює неперервність процесу горіння. Для запалення газової суміші використовується запальна електрична свічка. Із камери 1 продукти згорання попадають в турбину 3 і віддають частину своєї енергії ВН 2. Друга частина енергії витрачається на стиснення повітря в компресорі, а також розсіюється в навколишньому середовищі.

1.1.1 Газотурбінна установка

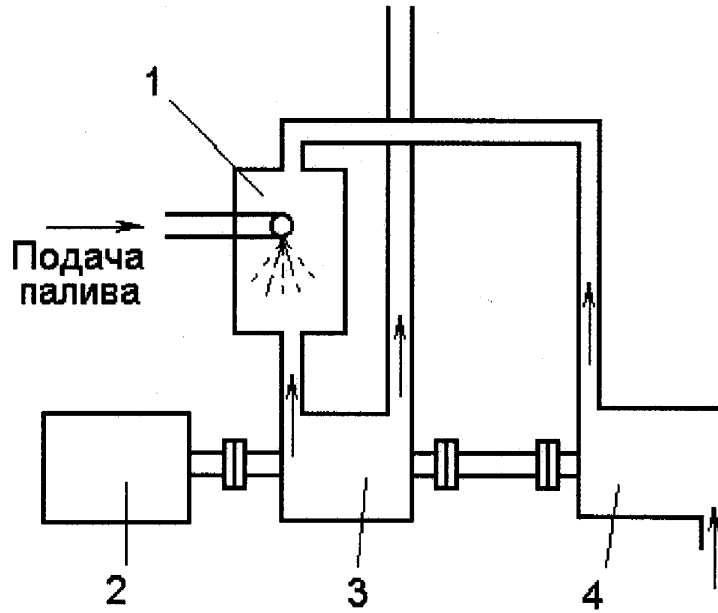


Рисунок 1.2 – Газотурбінна установка з підводом тепла при постійному тиску

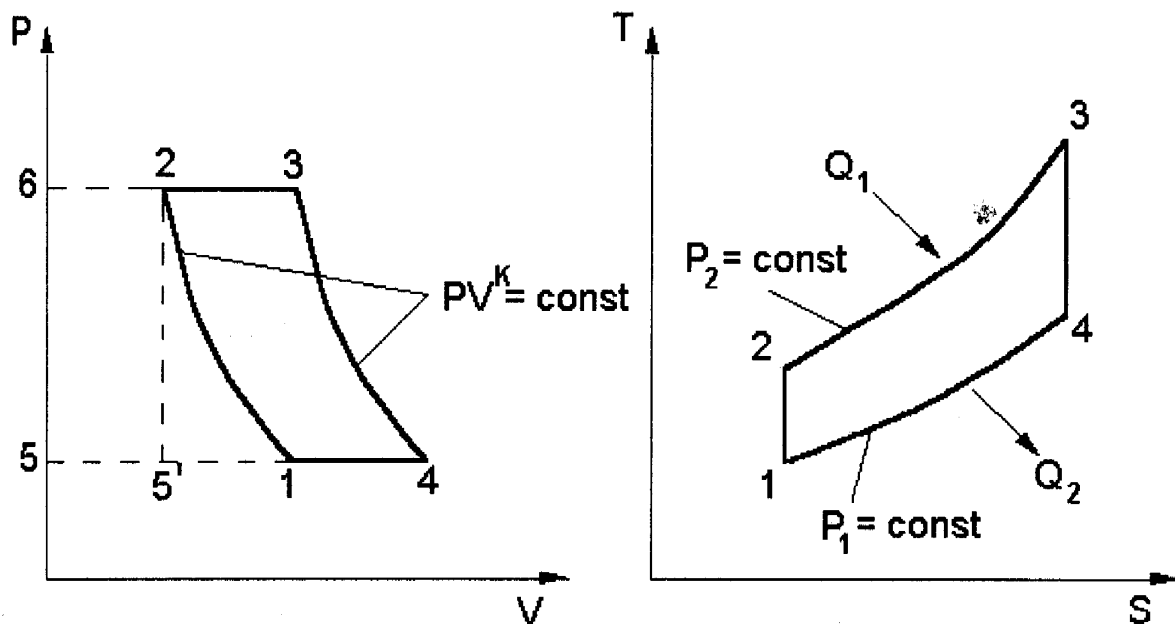


Рисунок 1.3 – Ідеальний цикл ГТУ з постійним тиском згорання і ізоентропійним стисненням

Ідеальний цикл для ГТУ (рис. 1.2) в координатах pv і ts показаний на рис. 3. Точка 1 відповідає стану повітря на вході в компресор; точка 2 - стан повітря

на виході з компресора; точка 3 - в кінці процесу спалювання, а точка 4 - в кінці процесу розширення в турбіні. Тоді лінія 1-2 зображує процес ізотермічного стиснення в компресорі; 2-3 - процес горіння (підводу тепла) при постійному тиску; 3-4 – ізотермічне розширення робочого тіла в турбіні; 4-1 – відвід тепла в результаті чого газ із стану 4 переходить в стан 1. Цей цикл є умовним. В дійсності йому відповідає повна заміна робочого тіла в турбіні.

Треба відмітити, що ідеальний цикл допускає відвід тепла через стінку посудини так, що маса повітря залишається постійною.

Основною характеристикою, яка характеризує ефективність роботи ГТУ є її коефіцієнт корисної дії (к.к.д.).

Для ідеального циклу к.к.д. це – відношення кількості тепла, яке переходить в механічну енергію, до загальної кількості тепла.

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (1.1)$$

де Q_1 – підведене в циклі тепло;

Q_2 – тепло, яке виноситься продуктами згорання.

В допущенні, що теплоємності C_v і C_p – постійні, маємо

$$Q_1 = C_p(T_3 - T_2), \quad (1.2)$$

$$Q_2 = C_p(T_4 - T_1). \quad (1.3)$$

Після підстановки (1.2) і (1.3) в рівняння (1.1) і виконання нескладних перетворень отримуємо:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{1 - \frac{T_1}{T_4}}{1 - \frac{T_2}{T_3}};$$

Із рівняння ізоентропійного процесу випливає, що

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}, \text{ або } \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_4}$$

Звідси

$$\eta_t = 1 - \varphi^{-m} \quad (1.4)$$

$$\text{де } \varphi = \frac{P_2}{P_1}; m = \frac{k-1}{k}; k = \frac{C_p}{C_v}.$$

Отже, для ідеального циклу (зі спалюванням палива при постійному тискові із ізентропічним стисненням і розширенням) термічний к.к.д. залежить тільки від ступеня стиску повітря φ і не залежить від кількості тепла, що підводиться в циклі, ні від теплотворної здатності палива.

При переході до реальної ГТУ необхідно враховувати і внутрішні втрати енергії турбіни і компресора, втрати в камері горіння і втрати в комунікаціях [4, 6].

Внутрішні втрати в турбіні і компресорі враховують через внутрішній відносний к.к.д. турбіни η_T і компресора η_k .

Якщо q_T - кількість палива, яке віднесене до 1 кг повітря, то через компресор проходить $1+q_T$ відносних одиниць продуктів згорання.

Втрати в камері згорання враховують к.к.д. камери згорання $\eta_{к.з}$, а втрати в комунікаціях відносять до η_k і η_T .

Нехай H_T і H_k – наявний тепловий перепад в турбіні і компресорі. Тоді корисні втрати

$$Q_k = (1 + q_T) \cdot H_T \eta_T - \frac{H_k}{\eta_k}. \quad (1.5)$$

Перший доданок – це кількість тепла, яка передається турбіні; другий доданок – кількість тепла, що витрачає компресор.

В камері згорання виділяється така кількість тепла:

$$Q_3 = (1 + q_T) Q_1 \frac{1}{\eta_{к.з}}, \quad (1.6)$$

де Q_1 – кількість підведеного тепла, що передається турбіні і компресорові.

Тоді к.к.д. реальної турбіни

$$\eta_e = \frac{(1 + q_T) \cdot \eta_T H_T - \frac{1}{\eta_k} H_k}{(1 + q_T) Q_1 \frac{1}{\eta_{к.з}}}. \quad (1.7)$$

В (1.7) чисельник дає корисну роботу установки, яка віднесена до 1 кг повітря, що поступає в компресор.

У випадку застосування газоподібного палива $q_T=0$. Кількість тепла, яке підводять в циклі, за умови, що $q_T=0$, обчислюється за формулою

$$Q_1 = C_p(T_3 - T_2) - C_p \Delta T, \quad (1.8)$$

де $\Delta T = T'_2 - T_2$

T'_2 – дійсна температура в кінці ізотропного процесу стиснення;

T_2 – температура в ідеальному циклі ізотропного процесу стиснення (T_2 – кінцева температура стиснення).

Величину T'_2 обчислюють у відповідності з виразом [5]

$$T'_2 = T_1 + \frac{1}{\eta_k}(T_2 - T_1). \quad (1.9)$$

Якщо T_2 записати як

$$T_2 = T_1 + (T_2 - T_1),$$

то вираз (1.8), з врахуванням (1.9) набуде такого вигляду

$$C_p \Delta T = C_p \left(\frac{1}{\eta_k} - 1 \right) \cdot (T_2 - T_1).$$

Значення H_T і H_k обчислюють за формулами:

$$H_T = C_p(T_3 - T_4),$$

$$H_k = C_p(T_2 - T_1).$$

$$\eta_B = \frac{\eta_T \frac{T_3}{T_1} \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right) - \frac{1}{\eta_k} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{\frac{T_3}{T_1} \left(1 - \frac{T_2}{T_3} \right) - \left(\frac{1}{\eta_k} - 1 \right) \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}.$$

Як і раніше, для ізоентропійного процесу справедливе співвідношення

$$\frac{T_1}{T_2} = \varphi^m \text{ і } \frac{T_4}{T_3} = \varphi^{-m} \text{ і}$$

$$\frac{T_2}{T_3} = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{T_1}{T_3} = \frac{\varphi^m}{\xi}, \text{ де } \xi = \frac{T_1}{T_3}.$$

З врахуванням останніх співвідношень маємо

$$\eta_s = \frac{(\eta_T \eta_K \xi \varphi^{-m} - 1)(\varphi^m - 1)}{\eta_K (\xi - 1) + 1 - \varphi^m}. \quad (1.10)$$

Збільшення ξ приводить до збільшення к.к.д. η_s ГТУ. Це означає, що пониження температури на вході в компресор приводить до збільшення його продуктивності.

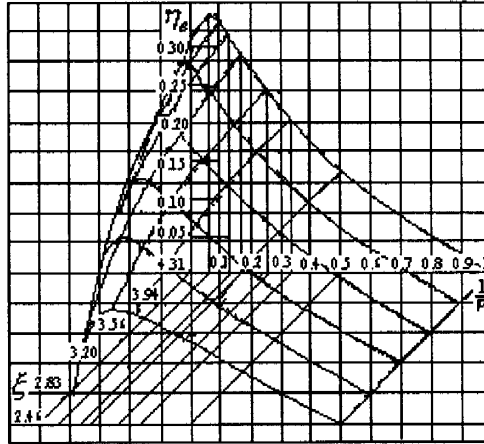


Рисунок 1.4 – Залежність внутрішнього к. к. д. ГТУ при постійному тиску згорання від ξ і φ

Зі збільшенням φ к.к.д. η_s ГТУ зростає і при певних значеннях φ досягає максимуму. На рис. 1.4 показана залежність к.к.д. ГТУ від двох змінних $\eta_s = y(\varphi, \xi)$; $\varphi \in [1, 40]$ і $\xi \in [2,46; 5,4]$; $\eta_T = 0,88$; $\eta_K = 0,85$; $m = 0,286$, а також числовим методом знайдено φ^* і ξ^* при якому досягається максимум η_s .

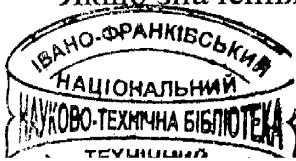
Внутрішні к.к.д. турбіни і компресора обчислюють за формулами [5, 7]

$$\eta_T = \frac{1 - \varphi^{-\eta_{cm} m}}{1 - \varphi^{-m}}, \quad (1.11)$$

$$\eta_K = \frac{1 - \varphi^m}{1 - \varphi^{m/\eta_{cm}}}, \quad (1.12)$$

де η_{cm} – к.к.д. ступені ГТУ.

Якщо значення (1.11) і (1.12) підставити в рівняння (1.10), то



$$\eta_e = 1 - \frac{\xi \varphi^{-m \eta_{cm}} - 1}{\xi - \varphi^{m / \eta_{cm}}}. \quad (1.13)$$

Позначимо через N_k і N_T потужності компресора і турбіни, а через λ_e відношення потужності, що розвивається турбіною до потужності, яка тратиться в компресорі. Тоді

$$\lambda_e = \frac{\eta_T N_T}{N_k / \eta_k} = \eta_T \eta_k \frac{N_T}{N_k};$$

або [5, 7]

$$\lambda_e = \eta_T \eta_k \frac{\xi}{\varphi^m}. \quad (1.14)$$

Аналіз формули (1.14) показує, що чим більша величина λ_e , тим менше змінюється внутрішній к.к.д. турбіни зі зміною η_T .

Збільшення температури перед турбіною сприяє збільшенню λ_e .

Іншою величиною, яка характеризує ефективність роботи ГТУ, є питома витрата повітря D_e на одну кіловат-годину потужності

$$D_e = \frac{3600}{c_p T_1 (\varphi^m - 1) (\eta_T \xi \varphi^{-m} - \eta_k^{-1})}. \quad (1.15)$$

Мінімальне значення D_e досягається при такому значенні φ^* :

$$\varphi_e^* = (\eta_T \eta_k \xi)^{\frac{1}{2m}}. \quad (1.16)$$

Слід відмітити, що значення φ знайдені для $\min : \eta_e$ і $\min : D_e$ не співпадають: має місце співвідношення $\varphi_e^* < \varphi_e^*$, де φ_e^* – ступінь підвищення тиску в компресорі знайдена із умови $\min : \eta_e$.

При всебічному аналізі ефективності роботи ГТУ в його основу повинні бути покладені чотири критерії:

$$\xi = \frac{T_3}{T_1}; \quad \lambda_e = \eta_T \eta_k \frac{N_T}{N_k}; \quad \varphi = \frac{P_2}{P_1};$$

$$D_e = \frac{3600}{c_p T_1 (\varphi^m - 1) (\eta_T \xi \varphi^{-m} - \eta_k^{-1})}$$

1.1.2 Ізотермічне стиснення в компресорі

Якщо застосовувати компресор з проміжним охолодженням, то процес стиснення можна наблизити до ізотермічного. Для здійснення ізотермічного стиснення від робочого тіла потрібно відвести кількості тепла, яке рівне роботі стиснення [8]

$$L_k = RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (1.17)$$

Тепер $\eta_i = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$, де $Q_2 = L_k + c_p(T_4 - T_1)$, $Q_1 = c_p(T_3 - T_2)$.

Оскільки $R = c_p m$, то

$$\eta_i = 1 - \frac{\varphi^m \ln \varphi^m - \xi - \varphi^m}{\varphi^m (\xi - 1)} \quad (1.18)$$

При $\xi \rightarrow \infty$ величина η_i набуде такого значення: $\eta_i = 1 - \frac{1}{\varphi^m}$, тобто прямує до величини, яка мала місце для ідеального циклу з ізоентропійним стисненням.

Оптимальне значення к.к.д. досягається за умови

$$\varphi^m = \xi, \quad (1.19)$$

що можливе лише за умови $T_4 = T_1$. Тобто цикл приймає вид, який показаний на рис. 1.5.

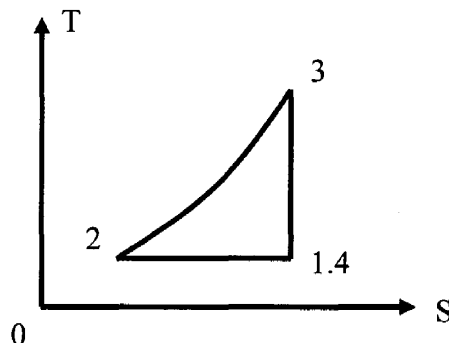


Рисунок 1.5 - Ідеальний оптимальний цикл ГТУ

В даному випадку відсутні витрати тепла з вихлопними газами, так як продукти згорання охолоджуються до температури всмоктування повітря. Підставивши (1.19) в рівняння (1.18), отримуємо

$$\eta_t = \frac{\ln \varphi^m}{\varphi^m - 1}.$$

Аналіз цієї формули показує, що високі значення к.к.д. можна отримати лише при великих значеннях φ . Оскільки кожному значенню φ відповідає своє значення ξ , то для досягнення високих значень η_t необхідні високі значення ξ .

Запишемо вираз для к.к.д. реальної турбіни при ізотермічному стисненні

$$\eta_e = \frac{\eta_T \eta_K \xi (\varphi^m - 1) - \varphi^m \ln \varphi^m}{\eta_K \varphi^m (\xi - 1)} \quad (1.20)$$

Прирівнюючи обидва цикли, можна прийти до висновку, що з точки зору теплової економічності при середніх значеннях φ і невисоких ξ кращі результати дає цикл з ізоентропійним (адіабатним) стисненням.

Відповідно маємо

$$\lambda_e = \eta_T \eta_K \frac{\xi (\varphi^m - 1)}{\varphi^m \ln \varphi^m} \quad (1.21)$$

і

$$D_e = \frac{3600}{c_p T_1 \left(\eta_T \xi (1 - \varphi^{-m}) - \frac{m}{\eta_K} \ln \varphi \right)}. \quad (1.22)$$

Порівнюючи ізоентропійний і ізотермічний цикли, можна прийти до висновку, що з точки зору значень λ_e і D_e , ізотермічний цикл дає кращі результати навіть у випадку застосування компресора з низьким к.к.д.

1.1.3 Статичний режим ГТУ

Статичний режим роботи ГТУ відтворюють у вигляді характеристики, яка графічно зв'язує основні параметри турбіни: витрату, частоту обертання та відношення тисків. Для того, щоб характеристика була універсальною, тобто

дійсною для будь-яких вхідних параметрів турбіни її будують в координатах критеріїв подібності. До них відносять:

- параметр витрати $\bar{G} = \frac{GP_{01}}{G_0P_1} \sqrt{\frac{T_1}{T_0}}$;
- параметр частоти обертання $\bar{n} = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{T_{01}}{T_1}}$;
- ступінь стиснення $\varphi = \frac{P_2}{P_1}$,

де індекс “0” відноситься до “базових” значень параметрів.

Будь-яка пара із вказаних параметрів однозначно визначає статичний режим ГТУ.

1.2 Математичні моделі ГПА з відцентровими нагнітачами

Компресорне обладнання магістральних газопроводів характеризується значним різноманіттям. За принципом роботи розрізняють поршневі (газомоторні) і відцентрові компресори. Найчастіше на магістральних газопроводах застосовують відцентрові компресори, які хоча поступаються поршневим в ступені стиснення, але значно випереджають їх за продуктивністю. Енергетичними приводами до нагнітача служать газотурбінні установки або електроприводи.

При оптимізації систем транспорту газу необхідний математичний опис лінійної частини газотранспортної системи (ГТС) і компресорних станцій.

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

Стендові характеристики ВН будуються для номінальних умов випробувань, тобто номінальних фізичних параметрів газу (T_{ec} , Z_{ec} , R) і частот обертання ротора нагнітача. Тому частіше користуються приведеними характеристиками ВН, які опубліковані ВНДІгаз (С. Н. Синицын) і є вдалими для розрахунку режимів КС при відхиленні параметрів газу від номінальних

[9,10]. Характеристики представлені у двох варіантах. В першому варіанті подані залежності ступеня стиснення ε , політропного к.к.д. ВН і приведеної відносної внутрішньої потужності від приведеної об'ємної подачі:

$$\varepsilon = \varphi_1(Q_{вс.нр}; \bar{n}_{нр}), \quad (1.23)$$

$$\eta = \varphi_2(Q_{вс.нр}), \quad (1.24)$$

$$\left[\frac{N_i}{\rho_n} \right]_{нр} = \varphi_3(Q_{вс.нр}), \quad (1.25)$$

де $Q_{вс.нр} = \frac{n_n}{n} Q_{вс}$ – приведена витрата; $\bar{n}_{нр} = \left[\frac{n}{n_n} \right]_{нр} = \frac{n}{n_n} \sqrt{\frac{Z_{нр} \cdot T_{вс.нр} \cdot R_{нр}}{Z \cdot T_n \cdot R}}$ –

приведена відносна частота обертання; $\left[\frac{N_i}{\rho_n} \right]_{нр} = \left(\frac{n_n}{n} \right)^3 \cdot \frac{N_i}{\rho_n}$ – приведена

відносна внутрішня потужність; $n_n, Z_{нр}, T_{вс.нр}, R_{нр}$ – параметри приведення газодинамічної характеристики, відповідно номінальна частота обертання, коефіцієнт стисливості, температура на всмоктуванні та газова постійна при номінальних умовах всмоктування.

В другому варіанті передбачена залежність ступеня стиску ε і приведеної потужності $[N_i]_{нр}$ від приведеної комерційної подачі $Q_{нр}$ і тиску газу на вході $P_{вс}$ при різних значеннях приведеної відносної частоти обертання.

Характеристики нагнітача першого типу мають більш універсальний характер і дозволяють побудувати, на відміну від характеристик другого типу, відносно просту і точну математичну модель.

У зарубіжній практиці як основну базову графічну характеристику нагнітачів застосовують $Q - H$ характеристику, яка є залежністю приведеної питомої роботи нагнітача H (Дж/кг) від приведеної об'ємної витрати $Q_{вс}$ за умов всмоктування і приведеної частоти обертання. Перевага цієї форми – це мінімум перерахунків даних заводських випробувань для побудови характеристики і максимальна простота математичної моделі. При використанні тричленної моделі наближення цієї характеристики в формі

$$H = a + bQ_{вс} + cQ_{вс}^2 \quad (1.26)$$

немає необхідності в перерахунку реальних і приведених значень, тобто змінні в формулі (1.26) є реальні величини H і $Q_{вс}$. З врахуванням частоти обертання залежність (1.26) має вигляд

$$H = a \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 + b \left(\frac{n}{n_n} \right) Q_{всм} + c Q_{вс}^2 \quad (1.27)$$

де $\frac{n}{n_n}$ – відносна реальна частота обертання;

a, b, c – коефіцієнти моделі, які визначені для кривої $\left[\frac{n}{n_n} \right]_{np} = 1$.

Для машинних розрахунків КС запропоновані різні способи апроксимації залежностей (1.23)-(1.25), описані в роботах [9, 11, 12].

При розрахунках режиму газотранспортних систем важливим є співвідношення для ступеня стиснення. А.Г. Немубров і В.И. Черников [11] запропонували характеристику як окремого ЦН, так і КС загалом апроксимувати рівнянням близьким по формі до рівня усталеного руху газу в трубі:

$$\varepsilon^2 = b_0 - b_1 \cdot Q_{вс}^2, \quad (1.28)$$

де b_0 і b_1 постійні коефіцієнти.

В розгорнутому вигляді, з врахуванням залежності характеристики від температури газу на вході, газової постійної і частоти обертання нагнітача вони рекомендують використовувати формулу:

$$\varepsilon^2 = b\omega - b_1 \cdot \frac{b\omega - 1}{b - 1} \cdot \left(\frac{n_n}{n} \right)^2 \cdot Q_{вс}, \quad (1.29)$$

де

$$\omega = \left[\frac{n^2 R_{np} T_{dc,np}}{n_n^2 RT} \cdot \left(1 - \frac{1}{b^{\frac{m-1}{2m}}} \right) + \frac{1}{b^{\frac{m-1}{2m}}} \right]^{2m}; \quad (1.30)$$

$R_{np}, T_{вс. np}, R, T$ - відповідно приведена газова постійна і температура на вході в нагнітач та робочі значення цих же параметрів;

n_n, n - відповідно номінальна і фактична частота обертання нагнітача;

m - показник політропи;

b, b_1 - значення коефіцієнтів при приведених параметрах R_{np}, T_{np} і n_n .

Відносна похибка у визначенні ступеня стиснення при обробці дослідних характеристик за рівнянням (1.28) не перевищує 1,5 % .

В роботі [3] запропоновані точніші апроксимації газодинамічних характеристик нагнітачів поліномами, коефіцієнти яких одержані на основі методу найменших квадратів. Показано, що точність апроксимації співрозмірна з точністю побудованих графіків вихідних характеристик, можна одержати, наближуючи (1.23) поліномом другого степеня, залежність (1.24) – многочленом четвертого, а характеристику (1.25) – поліномом третього степеня. Коефіцієнти апроксимації розраховувались при номінальній частоті обертання нагнітача. Середня похибка апроксимації, за оцінками авторів, не перевищує 0,12-0,6%.

В роботах [13,14] показано, що для скорочення машинного часу на обчислення, замість залежності (1.23) слід використати співвідношення для ефективного напору:

$$\frac{H_{ef}}{Z_{np} R_{np} T_{вс. np}} \cdot \left[\frac{n_n}{n} \right]_{np}^2 = f_1 \left(Q_{вс} \frac{n_n}{n} \right), \quad (1.31)$$

де Z_{np} – приведений коефіцієнт стисливості.

Ступінь стиску ε визначається із співвідношення [10]

$$\frac{H_{ef}}{Z_{np} R_{np} T_{вс. np}} = \frac{m}{m-1} \left(\varepsilon^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right) \quad (1.32)$$

або з його лінійного наближення для $\varepsilon < 1,3$

$$\frac{H_{ef}}{Z_{np} R_{np} T_{вс. np}} = 0.9(\varepsilon - 1). \quad (1.33)$$

Інші наближення, зокрема $\ln \varepsilon$ та $(\varepsilon^2 - 1)$ і межі їх використання та точність апроксимації проаналізовані детально авторами в [15].

В роботі [16] автором доведено можливість апроксимації (1) при фіксованій частоті обертання ротора нагнітача у вигляді експоненціальної функції $Q_{вс}$.

$$\bar{\varepsilon} = a_1 - a_2 e^{a_3 Q_{вс.пр}}, \quad (1.34)$$

де a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти апроксимації.

Показано, що середня похибка апроксимації складає 0,32%. В [3] відмічено, якщо перебудувати універсальну паспортну характеристику нагнітача в координатах ступеня стиску ε і приведенного відношення частоти обертання неробочого ходу $n_{н.х}$ до номінальної частоти обертання агрегату $\left(\frac{n_{н.х}}{n_n}\right)_{пр}$, то одержуємо серію прямих при різних приведених витратах $Q_{вс.пр}$ із слабкою “розбіжністю”. Така закономірність дозволяє записати загальну формулу для ступеня стиску, що відтворює залежність останньої від продуктивності і частоти обертання ротора нагнітача:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon} + (n - 1) \cdot a_3; \bar{n} = \frac{n}{n_n}, \quad (1.35)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – ступінь стиску визначена з виразу (1.34).

Перерахунок приведених характеристик до реальних умов вимагають використання певних термодинамічних показників природного газу за умов всмоктування, зокрема $Z_{вс}$ та $R_{вс}$. Коефіцієнт стисливості є функцією тиску $P_{вс}$ і температури $T_{вс}$ на вході нагнітача та відносної густини газу $\Delta = \frac{\rho_0}{\rho_n}$, тобто

$$Z_{вс} = f(P_{вс}, T_{вс}, \Delta), \quad (1.36)$$

де ρ_n – густина повітря при нормальних умовах;

ρ_0 – густина природного газу при $p_0 = 1.033 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ і $T_0 = 293 \text{ К}$.

Емпіричні залежності коефіцієнта стисливості представлені різними наближеннями в роботах [3, 15, 16]. Зокрема в [15], запропонована апроксимаційна формула виду:

$$Z_{ec} = 1 - 0.4273 P_{np} T_{np}^{-3.668}; \quad (1.37)$$

$$P_{np} = \frac{P_{ec}}{P_{нк}}, T_{np} = \frac{T_{ec}}{T_{нк}}, \quad (1.38)$$

де $P_{нк}$, $T_{нк}$ – псевдокритичні параметри, які залежать від густини газу.

В роботі [15], в результаті аналізу емпіричних залежностей, показано, що залежність $Z=f(P, T)$ для різних значень Δ представляють собою пучок прямих. Обмежуючись трьома діапазонами температур, одержані наступні формули для Z_{ec} :

$$Z_{ec}(P_{ec}, \Delta, T_{ec}) = (-0.457 \cdot 10^{-2} \Delta + 0.626 \cdot 10^{-3})(P_{ec} - 6) + 0.982$$

при $T_{ec} - 273 < 25^0 C$;

$$Z_{ec}(P_{ec}, \Delta, T_{ec}) = (-0.345 \cdot 10^{-2} \Delta + 0.446 \cdot 10^{-3})(P_{ec} - 6) + 0.985$$

при $25^0 C \leq T_{ec} - 273 < 25^0 C$;

$$Z_{ec}(P_{ec}, \Delta, T_{ec}) = (-0.125 \cdot 10^{-2} \Delta + 0.461 \cdot 10^{-3})(P_{ec} - 6) + 0.992$$

при $25^0 C \leq T_{ec} - 273$.

Універсальну залежність для Z_{ec} приведено в [3].

$$Z_{ec} = 1 - [(P_{ec} - 6)(0.354 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta - 0.446 \cdot 10^{-3}) + 0.015] \times [1.3 - 0.0144(T_{ec} - 283.2)]. \quad (1.39)$$

Це наближення є найвдалішим при машинних розрахунках КС.

Газова постійна за умов всмоктування визначається за формулою:

$$R_{ec} = \frac{R_n}{\Delta}, \quad (1.40)$$

де R_n – газова постійна для повітря.

Для характеристики течії в нагнітачі важливим є також закон зміни температур. Абсолютна температура на виході T_n визначається через температуру на вході T_{ec} формулою

$$T_n = T_{вс} \varepsilon^{1/\sigma}, \quad (1.41)$$

$$\text{де } \sigma = \eta_n \frac{k}{k-1};$$

η_n – політропний к.к.д;

k – показник адіабати.

Для спрощення розрахунків за формулою (1.41) в [4] запропонована спрощена залежність з врахуванням лінійного наближення за формулою (1.33), а саме

$$\frac{1}{T_{вс}} (T_n - T_{вс}) = \frac{0,9(\varepsilon - 1)}{\sigma}. \quad (1.42)$$

Дана залежність значно швидше реалізується при машинних розрахунках.

Для розрахунку енергетичних показників роботи ГПА, математична модель нагнітача має бути доповнена низкою додаткових показників, зокрема таких як ефективна потужність компресора $N_{еф}$, наявна потужність $N_{наяв}$ та коефіцієнт завантаження ГПА.

Ефективна потужність компресора:

$$N_{еф} = N_i + N_{мех}, \quad (1.43)$$

де $N_{мех}$ – механічні втрати для кожного виду приводу ГПА, які наближено рівні 100 кВт для газотурбінного приводу і 150 кВт для електроприводу.

На основі досліджень [9] авторами одержані спрощені залежності наявної потужності газотурбінної установки від частоти обертання ЦН і температури повітря t_n :

$$N_{наяв} = N_{ном} \cdot A - \alpha_2 \cdot \tau,$$

де

$$A = a_{00} + a_{10} n + a_{20} n^2 + a_{01} t_n + a_{02} t_n \cdot |t_n| + a_{11} n \cdot t_n; \quad (1.44)$$

τ – час, що пройшов після останнього ремонту;

α_2 – коефіцієнт, що враховує зменшення наявної потужності в міжремонтний період.

Для розрахунку $N_{наяв}$, можна використати також методику викладену в [11].

Коефіцієнт завантаження ГПА обчислюється в такий спосіб:

$$K_z = N_{ef} / N_{наяв} \quad (1.45)$$

Запас потужності для ГПА будь-якого виду:

$$\Delta N = N_{наяв} - N_{ef} \quad (1.46)$$

1.3 Критерії оптимальності режимів роботи компресорних станцій

Хронологія застосування критеріїв оптимальності свідчить про тенденції в управлінні процесом транспортування природного газу по трубопровідній мережі.

В 70-х роках з причини паливного дефіциту магістральні газопроводи експлуатувались в режимі максимальної пропускної здатності. Максимізація режиму за максимумом продуктивності [17, 18, 19] - основний критерій роботи вітчизняних магістральних трубопроводів того часу.

Крім наведеного критерію для оцінки функціонування газотранспортних мереж застосовували економічний критерій - мінімум експлуатаційних затрат.

Як правило, пропускна здатність трубопровідної системи лімітується компресорною станцією. Тому серед множини режимів появляється можливість вибрати оптимальний за критерієм мінімуму енерговитрат шляхом перерозподілення потужностей на інших ділянках [19].

Якщо виходити із схеми дворівневого керування роботою газотранспортної системи, то на думку авторів роботи [19], замість алгоритму оптимізації режиму за критерієм максимального завантаження і мінімуму енерговитрат [20] можна використовувати енергетичний метод розрахунку режиму роботи багатощехової КС [21].

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 тискові на початку газопроводу.

На другому етапі оптимізація здійснюється за другим критерієм - сумарних енергетичних витрат. При цьому як обмеження виступають пропускна здатність трубопроводу, яка знайдена на першому етапі оптимізації. Оптимізувати роботу компресорних станцій за мінімумом сумарної потужності пропонують і цілий ряд інших авторів [21, 22].

В сучасних умовах, коли об'єми поставок природного газу, як правило, оговорені застосовують економічні критерії оптимальності.

До них відносять: мінімум витрати паливного газу, максимум ККД та вище згаданий критерій мінімуму енерговитрат [23, 24, 25].

При використанні того чи іншого критерію оптимальності необхідно враховувати такі вихідні дані [26]:

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

В результаті розв'язку оптимізаційної задачі повинні бути вирішені такі питання [23, 24]

- оптимальне число і схема з'єднань на КС;
- кількість газу, яку перекачують різні групи ГПА;
- витрати потужності як для кожного агрегату, так і для КС в цілому;
- резерв потужності;
- коефіцієнт завантаження КС і агрегатів, а також вартісні витрати на компримування газу.

При вирішенні даних задач необхідно [23]:

- дотримуватись обмежень на положення робочої точки на характеристиках компресора, які зв'язані з вимогами безпомпажної

роботи компресора. Ця вимога повинна виконуватись не тільки як кінцева мета розв'язку задачі, але і на кожному кроці її розв'язку;

- враховувати конструкції обладнання компресорної станції, особливості технології транспорту природного газу через КС.

Як незалежні змінні при розв'язку задач оптимізації вибираються [23]:

- параметри стану природного газу на різних ділянках агрегатів і обладнання, що впливають на положення робочих точок на статичних характеристиках компресорів;
- положення кранів, які визначають конфігурацію трубної обов'язки компресорних цехів і компресорної станції в цілому.

Отже, аналіз робіт в області оптимізації КС показує, що вирішення задач оптимального розподілу навантаження між агрегатами КС може дати економію 2-3% від загальних енерговитрат.

1.4 Аналіз робіт в області оптимального керування компресорними станціями

Задачі оптимального керування компресорними станціями можна розділити на дві групи. До першої відносимо задачі, які розв'язуються на стадії проектування. Другу групу задач складають задачі, які виникають в процесі їх експлуатації.

Типова задача, яка відноситься до першої групи, розглянута в роботі [22]. Суть задачі в наступному.

Вибір схеми включення магнітів поршневих ГПА і розподіл навантаження між ними залежить від вхідних і вихідних параметрів та вибраного критерію оптимальності. Вхідні (зовнішні параметри) – це тиск на вході $P_{ВХ}$, тиск на виході P_K та масова продуктивність КС G_K .

Внутрішні (вихідні параметри) включають в себе:

число ступенів стиску – m ;

число включених магнітів - S_i ;

частота обертання - n_i ;

ступінь стиску Π_i .

Індекс “ i ” відноситься до послідовних ступеней, $i = \overline{1, m}$.

Отже, перша задача оптимізації статичного режиму КС зводиться до вибору таких внутрішніх параметрів – m , S_i , n_i , Π_i , які при заданих значеннях $P_{вх}$, P_K і G_K мінімізують чи максимізують вибраний критерій оптимальності.

Подібна задача розглянута і цілим рядом інших авторів. Назвемо основні роботи в цьому напрямку – це [9, 27, 28, 29].

В роботі [22] задача оптимізації роботи компресорних станцій розглянута для однотипних нагнітачів. При цьому знехтувані внутрішньостанційні втрати тиску. Для розв’язку задачі як вихідна інформація використовуються статичні характеристики нагнітача, які побудовані в координатах: ступінь стиску нагнітача - π , приведена витрата – q_{np} і є сімейством характеристик для приведеної частоти обертання n_{np} . На сімействі характеристик виділяють область керування, яку утворюють – вверху і внизу – гранична частота обертання нагнітачів; зліва – кривою помпажа, а справа – кривою гальмування (рис.1.6).

Як критерій оптимальності прийняті загальні затрати потужності на компримування газу:

$$RX = \sum_{i=1}^m \lambda_i r_i \quad (1.47)$$

$$\text{де } \lambda_i = \frac{\pi^{(x-1)/x} - 1}{\eta_i}$$

λ - показник адіабати;

η_i – к.к.д. i -го нагнітача;

r_i – коефіцієнт рециркуляції.

Ордината статичної характеристики, в якій повинна знаходитись робота точка нагнітача i -ої ступені, відповідає приведеній витраті

$$g_i^{(np)} = \frac{r_i G_{bx}^{(np)}}{S_i \prod_{v=1}^{i-1} \pi_v}, \quad (1.48)$$

$$\text{де } G_{bx}^{(np)} = G_k \frac{P^{(np)}}{P_{bx}} \sqrt{\frac{ZRT}{Z^{(np)} R^{(np)} T^{(np)}}};$$

Z – коефіцієнт стисливості газу;

R – газова постійна;

T – температура на вході в нагнітач.

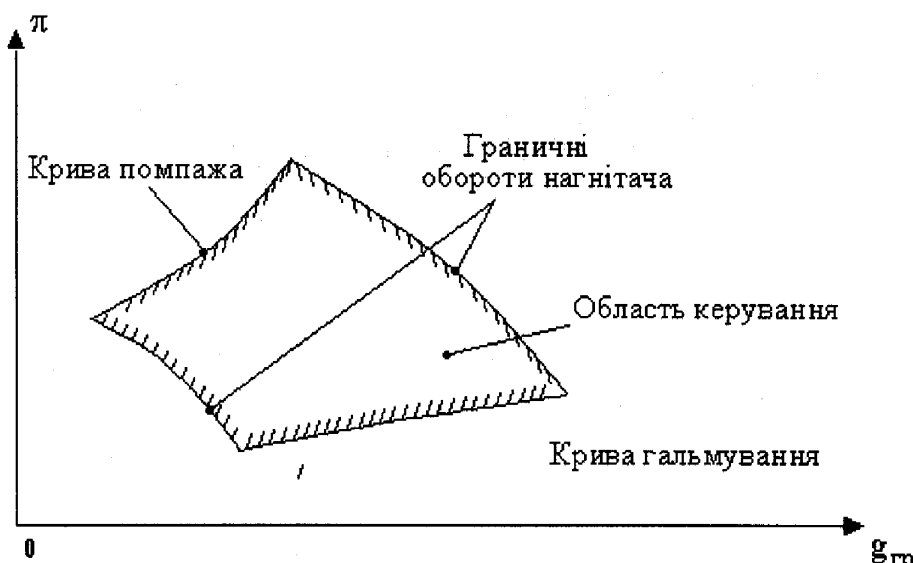


Рисунок 1.6 - Область керування для нагнітача

На основі отриманих співвідношень задану оптимізацію в [3] сформовано наступним чином:

В послідовно ввімкнених нагнітачах ступені стиску $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_m$ необхідно вибрати так, щоб забезпечити мінімум критерію оптимальності (1.47), за умови, що робочі точки повинні лежати на ординатах (1.48) допустимої області статичної характеристики, а значення коефіцієнта рециркуляції слід приймати близьким до одиниці.

Поставлену задачу розв'язано методом організованого перебору, який відомо під назвою методу віток і меж [30].

В роботі [31] 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 [22].

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

$$R(\bar{q}) = \sum_{i=1}^n N_i(q_i), \quad (1.49)$$

де $N_i(q_i)$ – енерговитрати i -ої вітки;

q_i – комерційна продуктивність i -ої вітки.

Статичні характеристики енерговитрат нагнітачів від продуктивності, які наведені, наприклад в роботі [32], апроксимовані квадратичним тричленом

$$N(q) = aq^2 + bq + c, \quad (1.50)$$

Де a , b і c – коефіцієнти апроксимації.

В структуру задачі оптимізації, наряду з критерієм (1.50), входять обмеження, що визначають баланс газу:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i, \quad (1.51)$$

А також нерівності

$$q_{i\min} \leq q_i \leq q_{i\max}, \quad (1.51)$$

де $q_{i\min}$ – мінімальне значення комерційної продуктивності, яке визначається зоною помпажу;

$q_{i\max}$ - максимальне значення q_i , що зумовлене зоною гальмування (рис.2.1).

Задача (1.50) з обмеженнями (1.51) і (1.52) є типовою для другої групи, де задана структура КС, а необхідно визначити розподілення навантаження між отриманими за відомим критерієм оптимальності з врахуванням технологічних обмежень.

Подібна задача розглянута і в роботі [33] стосовно до групи електроприводних ГПА.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку методів оптимального керування КС показує [23, 34], що задача оптимізації вирішується як дворівнева.

На верхньому рівні мінімізуються затрати на транспортування газу по мережі газопроводів і розподілу 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.

Помпаж - це процес автоколивань витрати і тиску. Виникнення помпажу пов'язано з виходом співвідношення робочих параметрів компресора за межі області стійкого функціонування. Виникнення помпажу веде до порушення нормального режиму роботи в системі "компресор-трубопровід", зниженню ресурсу обладнання і навіть до його руйнування. Тому питанням забезпечення безпомпажної роботи нагнітачів присвячено значне число публікацій [35, 36, 37, 38, 39].

Для забезпечення безпомпажної роботи системи "компресор - прилеглі трубопроводи" необхідно не допускати робочу точку на межу виникнення помпажу. Для цього необхідно [22, 38] - зменшити ступінь стиску газу, чи збільшити витрату газу через систему або знизити частоту обертання вала компресора. Перші два впливи здійснюються за допомогою циркуляційного газопроводу.

Вимога безпомпажної роботи ГПА є одним із основних обмежень при мінімізації витрат на транспортування газу через компресорний цех, компресорну станцію в цілому.

При такій постановці задачі за критерій оптимальності вибирають [22] 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.

Задачею мінімізації в такій її постановці є знаходження положення робочої точки ГПА на множині статичних характеристик, що забезпечує безпечний режим КС.

В роботі [40] висвітлені питання розрахунку оптимальної продуктивності газотранспортної системи та оптимального розподілу потоків газу в умовах непроектних режимів з врахуванням обмежень на технологічні параметри газотранспортних структур та коефіцієнта технічного стану КС. За критерій оптимальності прийнята різниця між надходженнями і витратами ресурсів. Основою для розрахунку є моделі виробничих функцій (залежність витрати паливного газу від об'єму транспортування) для лінійних ділянок магістральних газопроводів та КС.

В роботі [41] розглянута задача оптимізації режимів роботи багатоцехової компресорної станції (КС), яка включає в себе компресорні цехи (КЦ) з однотипними приводами (газотурбінні установки) відцентрових нагнітачів. За критерій оптимальності вибрано показник, який включає в себе як технологічні параметри, параметри зовнішнього середовища (температуру і тиск), так і кількість паралельно працюючих газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Обмеження задачі сформовані у вигляді деякої області $\Omega_{КЦ}$, яка визначається математичною моделлю КЦ.

Оскільки в такій загальній постановці задачу розв'язати практично неможливо, то запропоновано розбити її на дві підзадачі – структурної та параметричної оптимізації. На етапі структурної оптимізації знаходять множину допустимих включень ГПА, які задовольняють умові - $q_{КС}^- \leq q_{КС} \leq q_{КС}^+$, де $q_{КС}^-$, $q_{КС}^+$ - мінімальна та максимальна продуктивності КС. Для кожної із допустимих структур визначається оптимальна швидкість обертання ВН. Потім розв'язується задача вибору оптимальної структури на множині допустимих структур за умови, що відомі оптимальні швидкості обертання ВН. Сформована в такий спосіб задача структурної оптимізації по-перше є задачею

цілочисленного нелінійного програмування. Відомо [42], що такі задачі є NP – повними, тобто для їх розв'язку невідомі алгоритми з поліноміальною складністю. Евристичні алгоритми, які дають можливість отримати наближений розв'язок задачі, мають той недолік, що немає можливості оцінити похибки отриманих рішень. По-друге, на практиці, як правило, задається не умова $q_{KC}^- \leq q_{KC} \leq q_{KC}^+$, а конкретне значення продуктивності для КС. І нарешті математичною моделлю КС автори взяли співвідношення, які описують стаціонарний режим ділянки газопроводу від однієї компресорної станції до заданої. Слід відмітити, що в процесі роботи газотранспортної магістралі статичний режим практично не спостерігається, а проявляється ефект акумулюючої здатності трубопроводу. З огляду на різні схеми обв'язки трубопроводів і різноманітність промислового обладнання, виникають значні труднощі і у визначенні узагальнених коефіцієнтів гідравлічного і термічного опору для відповідних еквівалентних ділянок.

Таким чином аналіз роботи [41] показує, що основною проблемою при вирішенні задачі оптимізації роботи багатоцехової КС є підзадача структурної оптимізації, яка не знайшла свого задовільного вирішення.

1.5 Аналіз стану автоматизації компресорних станцій

Україна має потужну та розвинуту газотранспортну систему, в тому числі низку експортних магістральних газопроводів великого діаметра, які були введені в експлуатацію понад двадцять років тому. На той час системи керування компресорними агрегатами та компресорними станціями ґрунтувались на концепції централізованого керування і охоплювали тільки основні об'єкти інфраструктури КС.

Аналіз робіт по модернізації й упровадженню систем автоматичного керування (АК) ГПА [43] при реконструкції і введенню в дію нових КС ДК "Укртрансгаз" показує, що понад 62% діючих САК ГПА мають термін

експлуатації більше 15 років. Тому ДК "Укртрансгаз" відповідно до плану проводить реконструкцію КС, де поступово здійснюється заміна застарілих САК ГПА та технологічного обладнання. Для модернізації САК ГПА на Україні залучені як закордонні фірми так і вітчизняні виробники. Серед закордонних, компанією "Compressor Controls Corporation (CCC)" на основі спеціалізованих програмованих логічних контролерів (ПЛК) Series 4 автоматизовано 9 ГПА. Низка українських виробників активно включилась в модернізацію САК ГПА, серед них: фірма "СФ ІНЕК" та ЗФ ВАТ "Важпромелектропроект" на базі ПЛК Mikro PC (компанія "Octagon Systems") та ПЛК Series 30 та 90-70 (компанія "GE Fanuc Automation") впровадили відповідно 19 та 2 САК ГПА; КП "НВО Квантор" на базі комплексу програмно-технічних засобів "УНІКОНТ"-6 систем; НВП "Нова техніка" та НПП "Укргазгеоавтоматика" на основі контролерів компанії "GE Fanuc Automation" – 5 системи. Крім того, ДК "Укртрансгаз" за участю НДПАСУтрансгаз веде розробку нового покоління САК ГПА з використанням контролерів фірми "GE Fanuc Automation". Таким чином намітилась тенденція до впровадження нових САК ГПА на основі технічних засобів саме цієї компанії.

На КС-39 "Прогрес" введено в дослідну експлуатацію САК електроприводного ГПА розробника СФ "ІНЕК" із застосуванням ПЛК компанії "GE Fanuc Automation", тому модернізацію агрегатної автоматики КС-39 "УПУ" та КС-21 "Союз" доцільно провести на однотипних технічних засобах.

Аналіз досвіду розробки та впровадження автоматизованих систем керування (АСК) КС, що здійснює НДПАСУтрансгаз [44], яка є провідною установою в Україні по розробці, впровадженню та супроводженню агрегатних та цехових АСК, показує, що в їх основу закладений принцип децентралізації керування.

При створенні та впровадженні сучасних АСК КС враховують такі організаційні і технічні рішення:

-перехід від традиційних систем керування централізованого типу до системи розподіленого типу на базі локальних САК і функціонально-орієнтованих АРМ;

-розширення складу автоматизованих функцій керування, підвищення інтелектуального рівня технологічних задач, що забезпечує формування стратегії керування на основі фактичного стану устаткування і сучасних принципів автоматичного керування, регулювання і прогнозування;

-охоплення системою повного складу параметрів для автоматизації технологічних процесів як основного, так і допоміжного устаткування;

-системну інтеграцію програмно-технічних рішень, що реалізують взаємодію різних елементів АСК КС;

-оперативність і надійність диспетчерського керування за рахунок організації керування у реальному часі на базі SCADA-системи;

-підтримку головної виробничої задачі (транспортування газу) шляхом реалізації функцій планування, обліку і розвитку виробництва через організацію контуру керування з використанням СКБД ORACLE;

-відкритість системи і можливість її розвитку;

-підготовку КС до експлуатації в режимі дистанційного керування.

Основні функції АСК КС :

- * збирання, відображення та обмін інформацією між різними компонентами та рівнями системи;
- * контроль і аналіз технологічних режимів та стану обладнання КС;
- * ведення протоколу технологічного процесу та реєстрація відхилень від норми (попереджувальні та аварійні стани);
- * керування основним та допоміжним обладнанням КС;
- * автоматична стабілізація заданого режиму та захист КС;
- * ідентифікація та планування режимів ГПА і КС;
- * облік та аналіз обсягу газу, що транспортується і витрат паливного газу;
- * діагностика функціонально-технічного стану ГПА;

- * аналіз показників роботи і технічного стану обладнання КС;
- * облік фінансово-рахункових операцій та матеріально-технічних ресурсів.

Відмінності АСК КС новітнього зразка від традиційних систем керування:

- охоплення всіх об'єктів та всіх видів діяльності КС;
- реалізація диспетчерського керування у реальному масштабі часу;
- перехід від традиційних систем керування централізованого типу до системи розподіленого типу на базі локальних САК і АРМ;
- розширення складу автоматизованих функцій керування, підвищення інтелектуального рівня технологічних задач;
- автоматизація взаємозв'язаних рішень на основі єдиної бази даних;
- використання сучасних інформаційних технологій та ПТЗ;
- відкритість системи та можливість її розвитку і тиражування;
- єдиний інформаційний простір для доступу фахівців різних видів діяльності.

До чинників ефективності сучасних АСК КС можна віднести:

- підвищення надійності роботи обладнання і захисту його в аварійних ситуаціях;
- оптимізація прибутку за рахунок узгодження й оперативного рішення технологічних та виробничо-господарських задач;
- раціональні витрати паливно-енергетичних і матеріально-технічних ресурсів;
- збільшення ресурсу обладнання за рахунок раціонального забезпечення технічного обслуговування і планово-попереджувальних робіт, систематичної діагностики обладнання.

Дана концепція найповніше реалізована в АСК КС “Тарутине”, яка впроваджена в експлуатацію в 2000 році. Система охоплює всі основні та допоміжні об'єкти КС, об'єднані спільною мережею передачі даних.

Необхідно підкреслити, що розглянуті вище системи розраховані на керування групами ГПА окремих КС і не розраховані на координоване

керування куцем КС з різними типами ГПА та можливістю їх паралельної роботи. Тому задача оптимального розподілу навантаження між ними є важливою задачею, для розв'язку якої необхідна як апаратна підтримка так і програмне забезпечення оптимізаційної задачі.

1.6 Обґрунтування і вибір напрямку дослідження

Математичний опис роботи нагнітача достатньо точно описуються емпіричними або аналітичними моделями статички і служить основою існуючих інженерних методик розрахунку режимів роботи КС з різними схемами включення. Відомі інженерні методики розрахунку режимів роботи КС не враховують дрейф статичних характеристик ГПА в процесі експлуатації, а тому можуть використовуватись на стадії проектування. Емпіричні моделі статички ГПА, запропоновані різними авторами, не враховують параметри навколишнього середовища (температура повітря та атмосферний тиск), що знижує їх точність і робить малоприматними для цілей оптимального керування. Відомі роботи з оптимального керування процесами перекачки газу присвячені в основному оптимізації роботи газотранспортної мережі і в них практично не розглядались питання оптимізації процесу компримування газу. Як виняток становить робота [15], в якій в загальному виді поставлена проблема вибору оптимального режиму роботи компресорних станцій.

Тому для розробки системи оптимального керування роботою паралельно працюючих агрегатів з різними приводами необхідно розв'язати такі задачі:

1. Дослідити ГПА, як об'єкт керування, з метою виявлення вхідних і вихідних величин і на цій основі вибрати спосіб планування експериментального дослідження.

2. Створити адекватну процесу компримування газу математичну модель і придатну для вирішення задачі оптимального керування.

3. Сформулювати критерій оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів та встановити обмеження на технологічні параметри компресорних станцій.

4. Сформувати задачу оптимального керування процесом компримування природного газу та розробити методику її розв'язку.
5. Розробити програмне забезпечення задачі оптимального керування та метод її реалізації на промисловому об'єкті (КС).
6. Синтезувати оптимальну систему керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів та оцінити ефективність її функціонування.

РОЗДІЛ 2

ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ОБ'ЄКТІ З МЕТОЮ ЙОГО ІДЕНТИФІКАЦІЇ

2.1 Характеристика багатощехової КС як об'єкта керування

Газова промисловість України на сьогоднішній день – провідна галузь паливно-енергетичного комплексу нашої держави. Від її надійної роботи в значній мірі залежить стабільність національної економіки та постачання газу в країні Західної Європи.

В системі газопостачання провідну роль відіграє УМГ “Прикарпаттрансгаз”, яка в своєму складі має 18 компресорних станцій (КС) загальною продуктивністю 380×10^6 $\text{нм}^3/\text{добу}$. Загальні витрати газу на власні тільки по Богородчанському ЛВУМГ потреби складають 32×10^3 $\text{нм}^3/\text{год}$, а витрати електричної енергії – біля $1,2 \times 10^6$ $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{добу}$.

Компресорне обладнання магістральних газопроводів УМГ “Прикарпаттрансгаз” характеризується значною різноманітністю. Тут встановлено обладнання як вітчизняного виробництва (АТ СМЗ, м. Суми), так і зарубіжного виробництва (АТ ХЗЕМ, м. Хабаровськ; АТ НЗЛ, м. Санкт-Петербург; АТ ТМЗ, м. Екатеринбург; ЧДК, м. Прага; Купер-Бессемер, США; Нуово-Піньоне, Італія). Привід турбокомпресорів здійснюється за допомогою газотурбінних установок та електричних двигунів.

Як приклад розглянемо Богородчанську КС, яка складається з трьох цехів Богородчани-1, Богородчани-2 і Богородчани-4.

Технологічна схема Богородчанської КС приведена на рис. 2.1.

Газ на компресорну станцію поступає з трьох газопроводів – “Уренгой-Помари-Ужгород” (УПУ), “Прогрес” та “Союз”. Через перемички 23, 27, 28 і 31 (див. рис. 2.1) газ трьома потоками подається до КС-21 газопроводу “Прогрес”. Основні параметри ГПА, які встановлені на Богородчанській КС вміщує табл. 2.1. Основним елементом КС є газоперекачувальні агрегати (ГПА). Кожний ГПА конструктивно складається із привода і нагнітача (компресора).

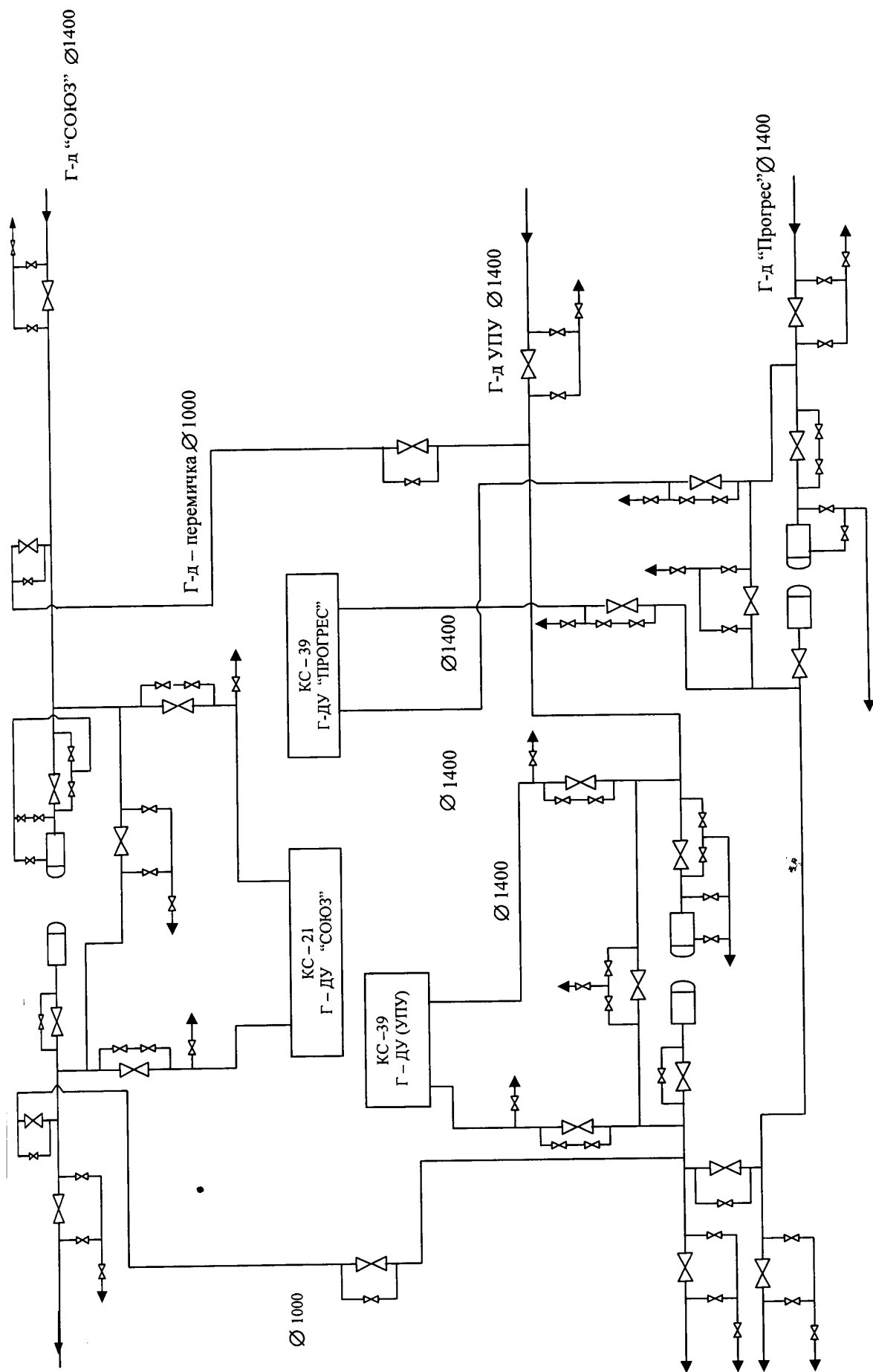


Рисунок 2.1 - Технологічна схема Богородчанської КС

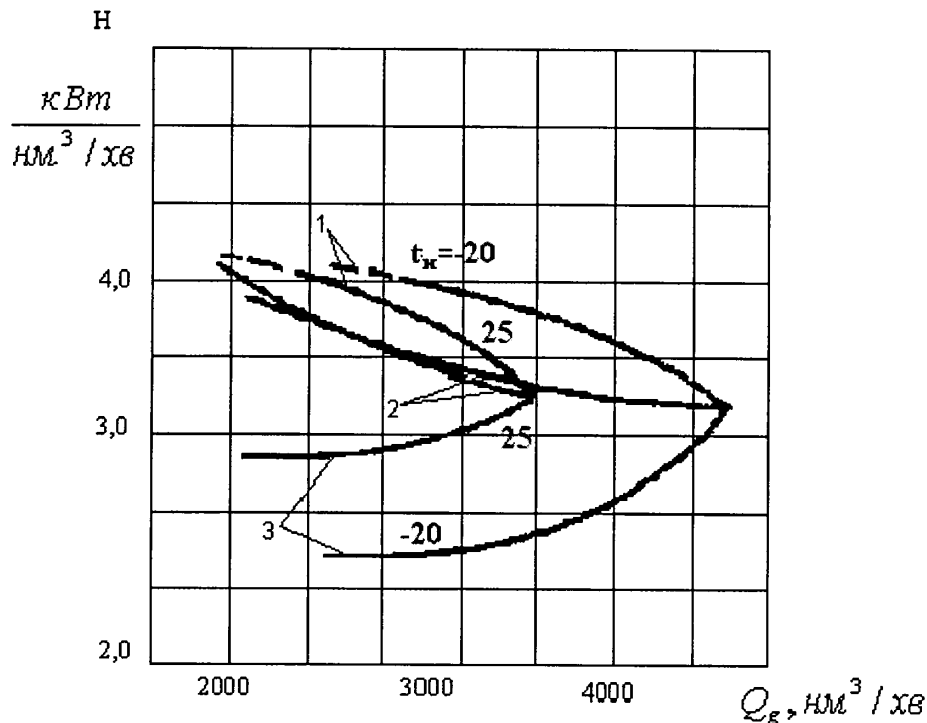
Приводи нагнітачів, які встановлені на Богородчанській КС, є двох типів – газотурбінні установки (ГТУ) і електроприводи (ЕП).

Таблиця 2.1 - Основні параметри ГПА, встановлених на КС УМГ “Прикарпаттрансгаз” при номінальних режимах

№ п. п.	Назва показників	Од. виміру	ТИП НАГНІТАЧА		
			650-21-2	RF-2BB-30	PCL-804-2 36
1.	Назва КС	-	Богородчани-4	Богородчани-1, Хуст	Богородчани-2, Голятин-1
2.	Тип приводу	-	ЕГПА-251	ГТК-101 (MS-3002)	ГТК-251 (MS-5002)
3.	Кількість нагнітачів	шт.	3	14	6
4.	Завод-виготовлювач	-	ЧКД Прага Чехія	Купер Бессемер США	Нуово-Ніньоне Італія
5.	Продуктивність при 20 ⁰ С і 760 мм. рт. ст.	млн. нм ³ добу	42.8	17.6	42.7
6.	Продуктивність при 20 ⁰ С і 760 мм. рт. ст.	тис. нм ³ год.	1 783.3	733.3	1 779.0
7.	Тиск газу на вході	ата	51.4	51.4	51.4
8.	Тиск газу на виході	ата	76	76	76
9.	Ступінь стиску	-	1.48	1.48	1.48
10.	Температура газу на вході в нагнітач	°С	15	15	15
11.	Температура газу на виході з нагнітача	°С	46	50	50
12.	Число коліс нагнітача	шт.	2	2	2
13.	Тиск паливного газу	кг/см ²	-	14	17
14.	Розхід паливного газу	тис.м ³ го д.	-	3.3	7.9
15.	Температура вихлопних газів за ТНТ (мах.)	°С	-	525	500

Регулювання витрати газу через компресор за допомогою зміни частоти обертання валу n відцентрового нагнітача (ВН) є найбільш практичним і економічним [45, 46].

Основним показником роботи ВН, який характеризує його економічність є питома потужність H [47]. Як приклад в [23] показані питомі потужності H в функції від n при різних способах регулювання продуктивності ВН – дроселюванням на вході і виході із компресора та зміною числа обертів при постійному тиску повітря в трубопроводі $P=0,26$ МПа (рис. 2.2 [47, с.224]).



1-дроселювання в нагнітанні;

2-дроселювання на всмоктуванні;

3-зміна частоти обертання.

Рисунок 2.2 – Питома потужність при $P = 0,26$ МПа = const і різних методах регулювання.

При дроселюванні на вході або виході ВН питома потужність зі зменшенням продуктивності збільшується, тоді як при зміні числа обертів вона падає зі зменшенням Q і є значно меншою ніж в двох раніше розглянутих випадках. При цьому досягається значне зменшення питомої потужності до 24,5% – влітку і до 36% – зимою при зменшенні Q/Q_0 до 60%, де Q_0 – початкове значення витрати. Автор роботи [47] підкреслює, що при дроселюванні на вході ВН питома потужність практично не залежить від початкової температури повітря t_n ; в той же час зміна числа обертів ВН приводить до зменшення питомої потужності приблизно пропорційно абсолютній початковій температурі t_n .

Таким чином, проведені дослідження дають можливість стверджувати [47], що при регулюванні продуктивності ВН шляхом зміни числа обертів досягається економія до 15% від потужності при дроселюванні.

Серед інших способів регулювання продуктивності ВН слід відмітити [47, 48] байпасування, включення-виключення агрегатів та закручування течії газу на вході в ВН за допомогою вхідного направляючого апарату (ВНА).

Байпасування не приводить до зменшення потужності компресора, але зменшується питома потужність компресора, оскільки байпасування приводить до зменшення продуктивності газопроводу.

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

Регулювання продуктивності ВН шляхом закручування течії газу можна здійснювати двома способами: за течією і проти течії.

В обох випадках змінюється напір, що створюється ВН [47]. Закручування течії в сторону течії зменшує напір ВН, а закручування течії в зворотну сторону – збільшує напір ВН.

Співставлення режимів керування за допомогою дроселювання на вході і закручуванням течії перед входом ВН показує, що втрати в питомій потужності доходять до 20% [47].

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

2.2 Проведення промислових досліджень

2.2.1 Умови експериментальних досліджень

Основною задачею досліджень було отримання експериментального матеріалу для побудови емпіричних моделей компресорних станцій.

Програма досліджень передбачала отримання математичних залежностей для основних параметрів газового потоку в залежності від технологічних параметрів роботи ВН.

На рис. 2.3 показана схема ГПА з приладами, які використовувались для

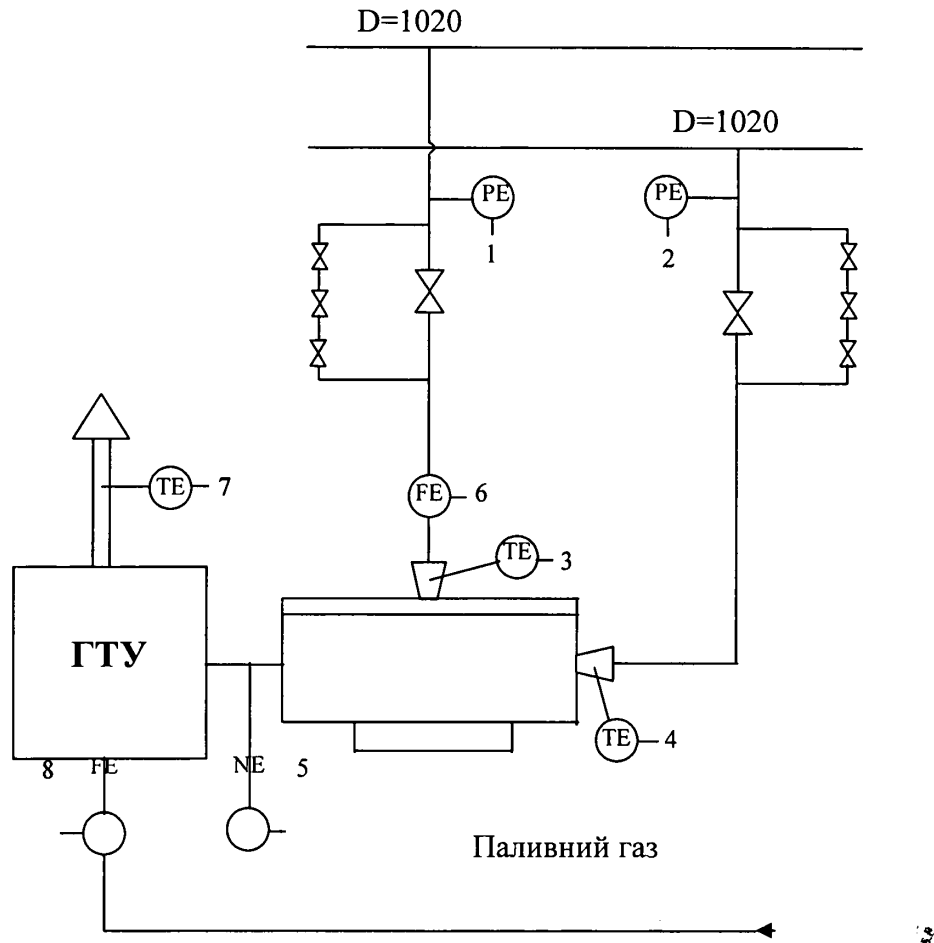


Рисунок 2.3 – Схема ГПА з вимірювальними приладами

вимірювання витрати газового потоку Q , витрати паливного газу q , тиску і температури $p_{2,6}$, $t_{2,6}$ на вході та $p_{вих,2}$, t_2 на виході КС, температури $t_{вих,2}$ продуктів згорання на виході із камери згорання ГТУ, а також частоти обертання залу нагнітача.

В табл. 2.2 приведені основні характеристики приладів, які використовувались при промислових випробуваннях.

Приводом ВН була ГТУ з керованою частотою обертання вихідного валу.

Частота обертання валу ВН змінювалась в межах від n_{min} до n_{max} . Нижня границя частоти обертання n_{min} вибиралась з умов безпомпажної роботи ВН, а верхня межа n_{max} обмежувалась граничною температурою продуктів згорання на виході камери згорання ГТУ.

Хімічний склад газу визначався шляхом аналізу проб газу. За даними хімічного аналізу були визначені основні параметри газу: густина газу ρ та відносна густина газу Δ за нормальних умов ($P_0=0,101325$ МПа, $T_0=293,15$ °К), газова постійна R та коефіцієнт стисливості Z .

Таблиця 2.2 – Основні характеристики приладів при проведенні експериментальних досліджень (КС – 21)

п. н. наск	Назва вимірюваного параметру	Тип приладу	Діапазон вимірювань	Клас точності
1	Тиск газу на вході ВН	Давачі фірми Honeywell	0-80 кг/см ²	0,5
2	Тиск газу на виході ВН	Давачі фірми Honeywell	0-80 кг/см ²	0,5
3	Температура газу на вході ВН	Давачі фірми Honeywell	0-60 °С	0,5
4	Температура газу на виході ВН	Давачі фірми Honeywell	0-60 °С	0,5
5	Частота обертання валу ВН	Фірма Дженерел електронік	0-8000 об/хв	0,5
6	Продуктивність ВН	Давачі фірми Honeywell	16,5 млн/добу	0,5
7	Температура продуктів згорання на виході ГТУ	Давачі фірми Honeywell	0-800 °С	0,5
8	Витрата паливного газу	Фірма Флоутек	6500 м ³ /год – 38000 м ³ /год	0,5

2.2.2 Визначення основних параметрів газового потоку

2.2.2.1 Густина газового потоку

Як приклад в додатку А показано результат хроматографічного аналізу природного газу, що подається до Богородчанського ЛВУМГ. За результатами такого аналізу визначені густина газу ρ та відносна густина газу Δ за повітрям при

нормальних умовах. Періодичність відбору проб газу складає приблизно 10 діб. Тому виникла задача про можливість використання середніх значень ρ і Δ в розрахунках параметрів газу.

Для вирішення поставленої задачі були проаналізовані дані, які отримані на протязі 2001 р. Із графіка зміни густини ρ в часі (додаток Б) видно, що дані мають певний тренд.

Найбільш поширеним методом [49] виявлення тренду є апроксимація даних многочленом не високого порядку за допомогою методу найменших квадратів.

Якщо заданий поліном порядку n

$$y = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + \dots + a_n u^n, \quad (2.1)$$

і маємо N даних ($N \geq n$), то параметри апроксимуючого полінома обчислюють шляхом мінімізації квадрату різниць заданої послідовності $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_N$ і значень многочлена, які обчислені при $u = u^{(1)}$, $u = u^{(2)}$, $u = u^{(N)}$. Ці значення позначимо через y_1, y_2, \dots, y_N . Тоді мінімізація виразу

$$Y(\bar{a}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2 \quad (2.2)$$

дає можливість визначити параметри a_0, a_1, \dots, a_n полінома (2.1). Слід зауважити, що в результаті мінімізації $Y(\bar{a})$ ми отримуємо не дійсні значення параметрів полінома (2.1), а його оцінки, які є випадковими величинами. Це пояснюється обмеженим числом даних, які отримані в рамках експериментального дослідження.

Мінімізація виразу (2.2) приводить до такого результату [50]:

$$\bar{a} = CF^T \tilde{Y} \quad (2.3)$$

де $\bar{a}^T = (a_0, a_1, \dots, a_n)$ – вектор оцінок параметрів полінома (2.1);

C – дисперсійна матриця

$$F = \begin{bmatrix} 1 & u^{(1)} & u^{(1)2} & \dots & u^{(1)n} \\ 1 & u^{(2)} & u^{(2)2} & \dots & u^{(2)n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & u^{(N)} & u^{(N)2} & \dots & u^{(N)n} \end{bmatrix} - \text{матриця розміром } N \times (n+1);$$

$\tilde{Y}^T = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_N)$ – вектор даних.

Дисперсійна матриця C обчислюється за такою формулою:

$$C = M^{-1}$$

де $M = F^T F$ – матриця Фішера.

В нашому випадку був вибраний поліном першого порядку ($n=1$):

$$y = a_0 + a_1 u \quad (2.4)$$

де u – має замість часу t , а y – це густина газу.

Результати обчислень (див. додаток Б) дали такі значення для шуканих параметрів полінома (2.4):

$$a_0 = 0,679$$

$$a_1 = 5,701 \cdot 10^{-6}$$

Значення коефіцієнта a_1 близьке до нуля і можна поставити запитання: чи дійсно $a_1=0$ і його відмінність від нуля є випадковою, чи в дійсності вихідні дані мають тренд?

Висунемо гіпотезу $H_0: a_1 = 0$ і альтернативну їй гіпотезу $H_1: a_1 \neq 0$.

Введемо безрозмірну t – статистичну Стьюдента

$$t = \frac{a_1 - \mu_0}{S_{a_1}},$$

де $\mu_0 = M[a_1]$ – математичне сподівання випадкової величини a_1 ;

$S_{a_1}^2$ – оцінка дисперсії випадкової величини a_1 .

Дисперсія $S_{a_1}^2$ обчислюється за формулою[49]:

$$S_{a_1}^2 = (c_{11})S_y^2,$$

де c_{11} – діагональний елемент дисперсійної матриці C ;

$$S_y^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{j=0}^{N-1} (\tilde{y}_j - y_j)^2 - \text{дисперсія вихідної величини.}$$

Якщо виконується умова [51]

$$|a_1| < t_{1-\alpha/2} S_{a_1},$$

то гіпотеза H_0 приймається.

В додатку В наведені результати обчислень, які показують, що має місце альтернативна гіпотеза H_1 , не дивлячись на те, що значення a_1 близьке до нуля. Тут можуть мати місце два випадки. По-перше, може мати місце помилка другого типу, коли гіпотеза H_0 відкидається хоч насправді вона є вірною. Такі помилки виникають тоді, коли об'єм вибірки обмежений.

Нехай β ймовірність помилки другого типу. Тоді при будь-якому розмірі вибірки N ймовірність помилки першого типу можна зробити досить малою. За рахунок зменшення рівня довіри α . Але при цьому зростає ймовірність β помилки другого типу. Єдиний спосіб одночасно зменшити α і β полягає у збільшенні розміру вибірки N [49].

По-друге, на протязі вказаного проміжку часу дійсно мав місце тренд і густина газу в середньому збільшувалась. Але таке збільшення є незначним і ним можна знехтувати. Для оцінки можливих діапазонів зміни ρ в часі побудуємо довірливий інтервал для лінії регресії (2.4).

Верхню і нижню межі довірливого інтервалу обчислюємо за формулами [51]:

$$U_i = Y_i + t_{1-\alpha/2} S_i, \quad (2.5)$$

$$L_i = Y_i - t_{1-\alpha/2} S_i, \quad (2.6)$$

$$\text{де } S_i^2 = S_y^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(t_i - t_{cp})^2}{\sum_{j=0}^{N-1} (t_j - t_{cp})^2} \right];$$

$$t_{cp} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} t_j.$$

Довірливі інтервали нанесені на графік (див. додаток Б)

Оцінімо діапазон зміни густини ρ - нижня межа: $U_0 - L_0 = 1.021 \cdot 10^{-3}$; верхня межа: $U_N - L_N = 1.008 \cdot 10^{-3}$.

Приведений аналіз даних показує, що тренд густини газу незначний і можна вважати, що математичне сподівання

$$m_\rho = M[\rho]$$

є незмінним в часі.

Оскільки практично обчислюється не m_ρ , а його точкова оцінка \hat{m}_ρ , яка є випадковою величиною, то слід оцінити близькості \hat{m}_ρ до його дійсного значення m_ρ . Така оцінка здійснюється шляхом побудови довірливого інтервалу для \hat{m}_ρ .

Якщо

$$t = \frac{\hat{m}_\rho - m_\rho}{S},$$

де S – оцінка дисперсії випадкової величини ρ , то довірливий інтервал обчислюється за такою формулою:

$$\hat{m}_\rho - t_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}} \leq m_\rho < \hat{m}_\rho + t_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}}$$

Величини \hat{m}_ρ і S^2 знаходять із таких співвідношень:

$$\begin{aligned} \hat{m}_\rho &= \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \rho_j, \\ S_\rho^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\rho_j - \hat{m}_\rho)^2. \end{aligned} \quad (2.7)$$

В результаті обчислень (див. додаток Б) маємо:

верхня межа довірливого інтервалу: $U=0,68$;

нижня межа довірливого інтервалу: $L=0,679$;

відносна ширина довірливого інтервалу:

$$\delta = \frac{U - L}{\hat{m}_\rho} \cdot 100\% = 0,094$$

Тепер оцінімо дисперсію випадкової величини за формулою (2.7) довірливий інтервал [49]

$$\frac{NS_{\rho}^2}{X_{N;\alpha/2}^2} \leq \sigma_{\rho}^2 < \frac{NS_{\rho}^2}{X_{N;1-\alpha/2}^2} \quad (2.8)$$

Обчислення за формулами доли такі результати:

$$S_{\rho}^2 = 6,453 \cdot 10^{-7} \text{ (кг/м}^3\text{)}^2;$$

$$4,002 \cdot 10^{-7} \leq \sigma_{\rho}^2 < 1,212 \cdot 10^{-6}.$$

Останнє співвідношення означає, що з $P=1-\alpha$ ймовірністю дійсне значення дисперсії σ_{ρ}^2 буде лежати в діапазоні $\sigma_{\rho}^2 \in [4,002 \cdot 10^{-7}; 1,212 \cdot 10^{-6}]$.

Таким чином, проведені дослідження дають можливість в розрахунках користуватись середнім значенням густини газу. При цьому: оцінка середнього значення густини газу: $\hat{m}_{\rho} = 0,679$, кг/м^3 (при $P_H = 0,101325$ МПа, $T_H = 293,15$ К); оцінка дисперсії $S_{\rho}^2 = 6,453 \cdot 10^{-7}$, $\text{(кг/м}^3\text{)}^2$.

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

$$PV = zmRT, \quad (2.9)$$

де z – коефіцієнт стисливості газу;

P – абсолютний тиск;

V – об'єм, який займає газ;

R – газова постійна;

T – температура газу в °К;

M – маса газу

Для нормальних умов $z=1$ і

$$P_H V_H = m_H R T_H \quad (2.10)$$

Рівняння (2.9) і (2.10) дають можливість визначити густину газу для умов, які відмінні від нормальних.

Поділимо рівняння (4.9) на (4.10) і врахуємо, що $\rho = m/V$, а $\rho_H = m_H/V_H$, тоді

$$\rho = \frac{\rho_H}{z} \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \frac{T_H}{T}. \quad (2.11)$$

2.2.2.2 Коефіцієнт стисливості газу

Є два способи обчислення коефіцієнта стисливості газу: за допомогою номограм та аналітичний на базі емпіричних залежностей.

Обчислення коефіцієнта стисливості газу за допомогою номограм [52] 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 стисливості z , слід відмітити [14, 16] такі:

$$z(P, T, \Delta) = (-0,457 \cdot 10^{-2} \Delta + 0,626 \cdot 10^{-3})(P - 6) + 0,982, \text{ при } T < 298 \text{ } ^\circ\text{K};$$

$$z(P, T, \Delta) = (-0,345 \cdot 10^{-2} \Delta + 0,446 \cdot 10^{-3})(P - 6) + 0,985, \text{ при } 298 \leq T < 323 \text{ } ^\circ\text{K};$$

(2.12)

$$z(P, T, \Delta) = (-0,125 \cdot 10^{-2} \Delta + 0,461 \cdot 10^{-3})(P - 6) + 0,992, \text{ при } T \geq 323 \text{ } ^\circ\text{K};$$

$$z(P, T, \Delta) = 1 - ((P - 6)(0,345 \cdot 10^{-2} \Delta - 0,446 \cdot 10^{-3}) + 0,015) \cdot (1,3 - 0,0144(T - 283,2)), \quad (2.13)$$

де P – тиск газу, *ата*.

Сучасні методики розрахунку коефіцієнта стисливості газу, наведені в ГОСТ 30319. 2-96 (NX19мод., GERG91мод., ВНИЦ СМВ), охоплюють діапазон від 0 до 12 МПа [53].

Для робочих інтервалів тисків і температур досить точною є формула обчислення коефіцієнта стисливості газу у відповідності з РД 50-213-80. За цією формулою

$$z \neq \left(1 + \frac{1,32 \cdot 10^{-3}}{T_c^{3,25}} \right)^2 \cdot \frac{P_c}{B_1 / B_2 - B_2 + Q_2 / 3}, \quad (2.14)$$

$$\text{де } P_c = 0,6714 P_{\text{пр}}; \quad T_c = 0,71892 T_{\text{пр}};$$

$P_{\text{пр}}$ і $T_{\text{пр}}$ – приведені тиск і температура [53].

Коефіцієнти B_1 , B_2 і Q_2 обчислюються у відповідності з РД-50-213-80.

В додатку В наведений аналіз формул (2.12) - (2.14) для обчислення z , який показує, що із збільшенням тиску і температури похибка в обчисленні z за

формулами (4.12) і (4.13) зростають і при $P=6$ МПа і $T=323.15$ °К досягає значення 5.66 % для формули (4.12) та 1.53 % - для формули (4.13).

2.2.2.3 Інші параметри газу

При подальших розрахунках нам будуть необхідні інші параметри газу: постійна стала газу R ; показник політропи m і показник адіабати k .

Газову постійну будемо обчислювати за формулою [54]

$$R=0,283/\Delta \quad (2.15)$$

Де R має розмірність, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°K})$;

Δ – відносна густина газу, яка обчислюється у відповідності із співвідношенням:

$$\Delta=\rho_n/\rho_{nn} \quad (2.16)$$

ρ_{nn} – густина повітря за нормальних умов ($\rho_{nn}=1,206 \text{ кг/м}^3$).

Показник політропи [47]

$$m = \frac{\lg(P_K / P_H)}{\lg(z_H T_H P_K) / (z_K T_K P_H)}, \quad (2.17)$$

де “ n ” і “ k ” – відповідно індекси, які означають початкове і кінцеве значення фізичних величин.

Показник адіабати обчислюється у відповідності з ГОСТ 303191. 1-96

$$k = \left[384 \cdot (1 - X_a) \cdot \left(\frac{P}{T} \right)^{0.8} + 26,4 X_a \right], \quad (2.18)$$

де X_a – мольні частки азоту, в частках одиниці;

P – тиск газу, атм.

Висновки до розділу

1. Компресорна станція як об'єкт керування є безінерційним елементом (в порівнянні з лінійною частиною газопроводу), що дає можливість знехтувати динамікою ГПА при розв'язку задачі оптимізації.

2. Серед вхідних величин ГПА є тільки одна керувальна дія (швидкість обертання вала нагнітача); інші вхідні величини неможливо цілеспрямовано змінювати, що робить проблематичним реалізацію активного експерименту на об'єкті.

3. Аналіз даних за один рік показує, що тренд густини газу незначний і можна вважати, що математичне сподівання є незмінним в часі і в практичних розрахунках можна користуватись середнім значенням густини газу.

4. Зроблений вибір способу обчислення основних параметрів газового потоку – коефіцієнта стисливості, газову постійну; показники політропи і адіабати, що дає можливість мінімізувати похибки обчислень параметрів газових потоків.

РОЗДІЛ 3

ЕМПІРИЧНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КОМПРИМУВАННЯ ГАЗУ

3.1 Аналіз процесу компримування газу як об'єкта моделювання.

Аналіз ГПА як об'єкта керування показує, що керуючими діями є частота обертання вала кожного із нагнітачів. Оскільки нагнітачі розділені на групи (цехи) і в кожній із них зібрані однотипні нагнітачі, то допускається, що вони мають однакові статичні характеристики.

Розглянемо i -ту ГПА, як об'єкт моделювання, яка характеризується керуючою дією n_i та зовнішніми впливами ξ_{ij} , де j - номер зовнішнього впливу для i -ої ГПА; $j = \overline{1, K}$; K - кількість зовнішніх впливів (рис. 3.1).

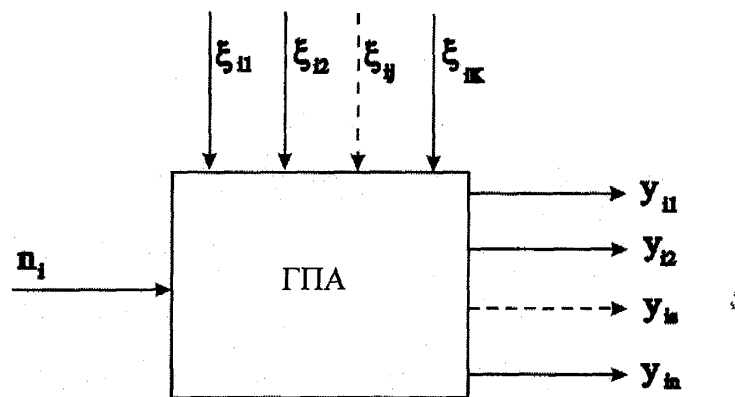


Рисунок 3.1 – ГПА, як об'єкт моделювання.

Сукупність величин n_i та ξ_{ij} утворюють групу вхідних величин нагнітача. Реакція керованого об'єкта на вхідні величини характеризується певними показниками роботи нагнітача – вихідними величинами y_{is} , $s = \overline{1, n}$, де n - кількість вихідних величин.

Зміст вихідних величин нагнітача визначає задача оптимального керування. Розглянемо два типи нагнітачів з газотурбінним приводом (ГТП) і з електроприводом (ЕП).

Для першої групи нагнітачів вихідними величинами будуть:

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

Для другої групи нагнітачів відповідно будемо мати:

- потужність приводу нагнітача;
- температура газу на виході із нагнітача;
- продуктивність нагнітача;
- струм приводу нагнітача.

Кожна із перерахованих вихідних величин є функцією керуючої дії n_i та зовнішніх впливів ξ_{ij} ,

$$y_{is} = \varphi_{is}(n_i, \xi_{ij}). \quad (3.1)$$

Проведений аналіз літературних джерел і роботи компресорних станцій Богородчанського ЛВУМГ виявив [58], що для нагнітачів з ГТП – витрата паливного газу q , температура газу на виході нагнітача t_2 ,^s продуктивність нагнітача Q , є функціями частоти обертання вала нагнітача n , температури газу на вході в нагнітач $t_{2.в.}$, ступеня стискування газу ε , тиску газу на вході в нагнітач $p_{2.в.}$ та температури t_c та тиску $p_{ам}$ навколишнього середовища, тобто

$$\{g, t_2, Q\} = \varphi_i(n, t_{2.в.}, \varepsilon, p_{2.в.}, t_c, p_{ам}), \quad i = \overline{1,3}. \quad (3.2)$$

Відповідно для температури вихлопних газів будемо мати:

$$t_{вих.2} = \varphi_4(n, \varepsilon, p_{2.в.}, t_c, p_{ам}). \quad (3.3)$$

Відмітимо, що на відміну від робіт [15, 18, 56] в математичні моделі включена температура та тиск навколишнього середовища. На значний вплив цих параметрів на роботу ГТП відмічено в (3.3). В процесі побудови

математичних моделей (3.2) і (3.3) це припущення авторів [57, 58] повністю підтвердилось.

Аналогічний аналіз роботи нагнітачів з ЕП показав, що вони характеризуються такими вихідними параметрами, як потужність приводу нагнітача $N_{\text{наг}}$, продуктивність нагнітача Q , температура газу на виході із нагнітача t_2 та струм споживання приводом нагнітача $I_{\text{наг}}$.

Ці вихідні величини є функціями вхідних величин:

$$\{N_{\text{наг}}, Q\} = f_i(p_{z.в.}, \varepsilon, m, t_c), \quad (3.4)$$

$$t_2 = f_2(t_{z.в.}, \varepsilon, p_{z.в.}, n, t_c), \quad (3.5)$$

$$I_{\text{наг}} = f_i(\varepsilon, p_{z.в.}, n). \quad (3.6)$$

Задача полягає в тому, щоб за результатами експериментального дослідження ідентифікувати значення (3.2) – (3.6), яку можна подати як функціональну залежність між певним набором вхідних величин $\bar{u}^T = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ і виходом багатовимірного об'єкта $\bar{y}^T = (y_1, y_2, \dots, y_k)$.

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

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

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

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

Таким чином, задачею ідентифікації є знаходження залежності $\check{\varphi}(\bar{u})$ за умови дії на об'єкт перешкоди, статистичні характеристики якої в загальному вигляді невідомі.

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

Оснoву другого шляху складає експериментальний підхід, коли залежність $y(u)$ приймається як деякий постулат. 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.

3.2 Обґрунтування та вибір емпіричних моделей процесу компримування газу

Відомо, що в залежності від наявності у дослідника апріорної інформації про структуру моделі об'єкта можна виділити два випадки:

а) структура функцій (3.2) – (3.6) відома. В цьому випадку задача побудови математичної моделі зводиться до вибору невідомих коефіцієнтів залежностей (3.2) – (3.6);

б) відомо, що кожна із залежностей (3.2) – (3.6) співпадає з однією із функцій з певного класу функцій.

Необхідно визначити цю функцію і знайти невідомі параметри:

Останній випадок є найпоширенішим в практиці створення математичних моделей КС [15].

Для математичного опису залежностей (3.2) – (3.6) використаємо багатовимірну нелінійну апроксимацію, яка має вигляд многочлена:

$$y = \sum_{s=1}^k a_s \prod_{i=1}^N u_i^{q_{is}}, \quad (3.7)$$

де a_s - коефіцієнти полінома (параметри моделі);

q_{is} - невід'ємні цілі числа, які обмежені величинами Q_i :

$$0 \leq q_{is} \leq Q_i.$$

Якщо величини Q_i задані, то число поліномів моделі (3.7) складе [56]:

$$k = \prod_{i=1}^N (Q_i + 1).$$

Це число може бути досить великим. Допустимо, що вибрана модель (3.5), для якої $N=5$ і нехай $Q_i=3$, тоді $k=4^5=1024$. Тому степінь полінома необхідно обмежити через вимогу, щоб сумарна степінь поліномів не перевищувала задану величину:

$$\sum_{i=1}^N q_{is} \leq Q, \quad s = \overline{1, k}.$$

Позначимо кількість коефіцієнтів моделі (3.7) через $Z_N(Q)$. Тоді функція $Z_N(Q)$ задовольняє наступному рекурентному співвідношенню [56]:

$$Z_i(j) = Z_i(j-1) + Z_{i-1}(j) - Z_{i-1}(j-1-Q), \quad (3.8)$$

$$i = \overline{1, N};$$

$$j = \overline{1, Q}.$$

$$Z_i(j) = \begin{cases} 1, & \text{для } j = 0, i = \overline{1, N}, \\ 1, & \text{для } i = 0, j = \overline{0, Q}; \\ 0, & \text{для } j < 0, i = \overline{1, N}. \end{cases}$$

Тепер задача вибору типу апроксимуючої залежності зводиться до вибору величини Q при відомому числі вхідних змінних N .

Якщо вибрана величина Q , то задача побудови математичної моделі зводиться до обчислення невідомих коефіцієнтів в залежності (3.7).

Стосовно способу одержання необхідного матеріалу для побудови моделі (3.7) можна говорити про активні і пасивні експерименти.

Активний експеримент передбачає, що на вхід досліджуваного об'єкта подаються впливи за певним планом [57]. 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.

Аналіз моделей (3.2) – (3.6) показує, що реалізувати активний експеримент в умовах роботи нагнітача в газовій мережі неможливо, оскільки ряд параметрів ($P_{z.в.}, t_{z.в.}$) задаються режимом роботи попередньої КС, а t_c і $p_{ат}$ принципово неможливо змінювати в бажаному напрямку.

Оскільки реалізувати активний експеримент на об'єкті (нагнітачі) неможливо, розумною альтернативою є використання природних змін для побудови математичної моделі нагнітача.

При цьому виникає ряд технічних задач, які необхідно розв'язати, щоб отримати адекватну модель процесу. Перш за все потрібно визначити необхідне число точок контролю і частоту вимірювання фізичних параметрів, які визначають режим роботи нагнітача.

Автори роботи [53] показали, що при необхідності відновлення режимного параметра, який розглядається, як випадковий процес, з 5-ти відсотковою похибкою, періодичність вимірювання складає 24 виміри за добу. Відповідно з такою періодичністю повинні вимірюватись і параметри, які входять в математичну модель (3.2) – (3.6).

Існуючі системи автоматизованого збору інформації про процес компромуння газу не забезпечують архівування результатів вимірювання за тривалий проміжок часу. Ця обставина заставляє використовувати інформацію, яка фіксується в диспетчерських журналах ЛВУМГ.

Приклад сформованої бази даних за допомогою програмного продукту (ПП) Excel, показаний у вигляді фрагменту Excel – таблиць (рис 3.2, 3.3).

Основні вимірювальні параметри - тиск на вході і виході КС, температура вихлопних газів, частота обертання валу турбіни низького тиску (ТНТ) і витрата газу, що поступає на КС. Періодичність вимірювання цих параметрів складає 12 замірів на добу. Витрата коливного газу для ГПА вимірюється тільки один раз на добу.

На рис. 3.3 показаний фрагмент таблиці для турбогенератора №1, в якій занесені значення, так званих, загальностанційних параметрів, таких як температура повітря на вході і на виході осьового компресора (ОК), температура

повітря перед і за диском турбіни високого тиску (ТВД), температура повітря за і перед диском ТНТ, температура газу на вході і на виході нагнітача та тиск повітря за ОК і газу після регулюючого клапану. Кожна із цих величин

Дата	№	Година	Параметри					
			Турбогенератор №1					
			Р газу на вході (кг/см ²)	Р газу на виході (кг/см ²)	Віддаленість від помпажу	Т-ра вихлопних газів	Оберти валу ТВТ	Оберти валу ТНТ
Гіперпосилання			Початок	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
			0	1	2	3	4	5
11.12.00	1	22	48,1	67	4,3	512	100	93
11.12.00	2	24	48,1	67	4,3	512	100	93
12.12.00	3	2	48,2	67	3,6	504	100	91
12.12.00	4	4	48,2	67	4	507	100	92
12.12.00	5	6	48,4	67,3	4	502	100	92
12.12.00	6	8	48,4	67,3	4	502	100	92
12.12.00	7	10	49	67,5	3,3	495	100	91
12.12.00	8	12	49	67	2,7	507	100	91
12.12.00	9	14	48,5	66,5	2,5	510	100	91
12.12.00	10	16	48,5	66,5	2,8	511	100	91
12.12.00	11	18	48	66	2,8	502	100	91
12.12.00	12	20	48	66	3	499	100	91
12.12.00	13	22	48,4	65,6	3,8	496	100	91
12.12.00	14	24	48,4	65,5	3,4	496	100	91
13.12.00	15	2	48,2	65,2	3,2	497	100	91
13.12.00	16	4	48,2	65,4	3,1	498	100	91
13.12.00	17	6	48,4	65,6	3,2	499	100	91
13.12.00	18	8	48,4	65,8	3,2	499	100	91
13.12.00	19	10	49,5	65	3,8	510	100	92
13.12.00	20	12	49,5	65	3,8	512	100	92
13.12.00	21	14	50	65	4	515	100	92
13.12.00	22	16	50	65	4	513	100	92
13.12.00	23	18	50	65	4	513	100	92
13.12.00	24	20	50	65	4	512	100	92
13.12.00	25	22	48,5	66	4,2	512	100	92
13.12.00	26	24	48,5	66	4	518	100	92

Рисунок 3.2 – Фрагмент Excel-таблиці параметрів, що характеризують роботу КС –21 "СОЮЗ"

вимірюється з певною похибкою (табл. 3.2), яка залежить від методу приладу і від оператора, що здійснює відлік фізичних величин. По суті справи, процес

Дата	№	Година	Загальностанційні параметри									
			Турбогенератор №1									
			Температура								Тиск	
			повітря				газу					
на вході в ОК	на виході з ОК	перед диском ТВТ	за диском ТВТ	перед диском ТНТ	за диском ТНТ	на вході	на виході	повітря за ОК	газу після рег. клапана			
Гіперпосилання			Початок	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
12.12.00	1	10	9,0	246	313	298	303	282	20	48	5,2	6,4
12.12.00	2	22	8,0	240	306	291	294	273	20	48	5,2	6,4
13.12.00	3	10	9,0	241	307	290	293	272	20	48	5,1	6,2
13.12.00	4	22	10,0	247	313	295	297	275	21	48	5,2	6,3
14.12.00	5	10	11,0	247	315	299	304	282	21	48	5,2	6,4
14.12.00	6	22	9,0	246	212	295	296	275	21	48	5,2	6,4
15.12.00	7	10	10,0	244	310	295	301	279	21	48	5,2	6,4
15.12.00	8	22	9	243	309	294	299	278	21	48	5,1	6,3
16.12.00	9	10	7,0	241	307	291	297	276	21	48	5,3	6,3
16.12.00	10	22	6	241	306	291	295	274	21	48	5,1	6,3
17.12.00	11	10	4,0	235	301	284	287	266	21	48	5,1	6,3
17.12.00	12	22	9,0	244	311	295	300	277	20	48	5,1	6,3
18.12.00	13	10	9,0	244	310	293	297	274	21	48	5,1	6,3
18.12.00	14	22	6,0	242	307	290	305	268	21	48	5,2	6,2
19.12.00	15	10	7,0	242	308	292	296	273	21	48	5,2	6,3
19.12.00	16	22	5,0	240	305	288	289	268	21	48	5,1	6,2
20.12.00	17	10	4,0	224	307	292	296	273	21	48	5,2	6,3
20.12.00	18	22	6,0	233	301	285	282	261	20	48	5,8	6,3
21.12.00	19	10	6,0	233	300	283	284	260	22	48	5,2	6,3
21.12.00	20	22	7	232	301	287	282	260	20	48	5,2	6,5
22.12.00	21	10	9	234	303	289	291	264	20	48	5,8	6,4
22.12.00	22	22	8	234	302	286	290	265	20	48	5,4	6,4
23.12.00	23	10	7	234	302	276	290	265	20	48	5,4	6,4
23.12.00	24	22	8	236	304	288	290	268	20	48	5,2	6,4
24.12.00	25	10	7	237	300	277	291	266	20	48	5,2	6,4
24.12.00	26	22	9	235	305	290	294	272	20	48	5,7	6,4
25.12.00	27	10	8	235	304	289	292	271	20	48	5,3	6,4
25.12.00	28	22	7	235	304	289	294	273	20	48	5,2	6,4
26.12.00	29	10	5	234	303	287	289	268	20	46	5,1	6,2
26.12.00	30	22	7	237	305	289	293	274	20	46	5,1	6,3
27.12.00	31	10	8	244	312	297	303	282	20	48	5,2	6,5
27.12.00	32	22	9	247	310	301	306	285	20	49	5,2	6,4

Рисунок 3.3 – Фрагмент Excel-таблиці загальностанційних параметрів (КС - 21"СОЮЗ")

відліку фізичних величин оператором є квантуванням, що означає вибір між двома сусідніми значеннями шкали (рис. 3.4).

Нехай $P(x)$ - густина ймовірності похибки квантування [49]:

$$P(x) = \begin{cases} 1, & -0.5 \leq x \leq 0.5; \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Дисперсія похибки обчислюється за формулою:

$$\delta_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 P(x) d(x).$$

В силу того, що крива залежності $P(x)$ симетрична відносно точки $x = 0$, то математичне сподівання $\mu(x) = 0$. Отже:

$$\delta_x^2 = \int_{-0.5}^{0.5} x^2 d(x) = \frac{1}{12}.$$

Відповідно середньоквадратичне відхилення:

$$\delta_x = \sqrt{1/12} = 0.29 \text{ ціни поділки.}$$

Наприклад, дані про температуру газу на вході і виході нагнітача знімаються оператором з точністю до одного градуса. Тоді $\delta_x = 0.29^\circ\text{C}$. При значенні $t^\circ = 20$ похибка квантування, що вноситься оператором складе $\approx 1.5\%$. Ця величина може перевищувати похибку вимірювального пристрою.

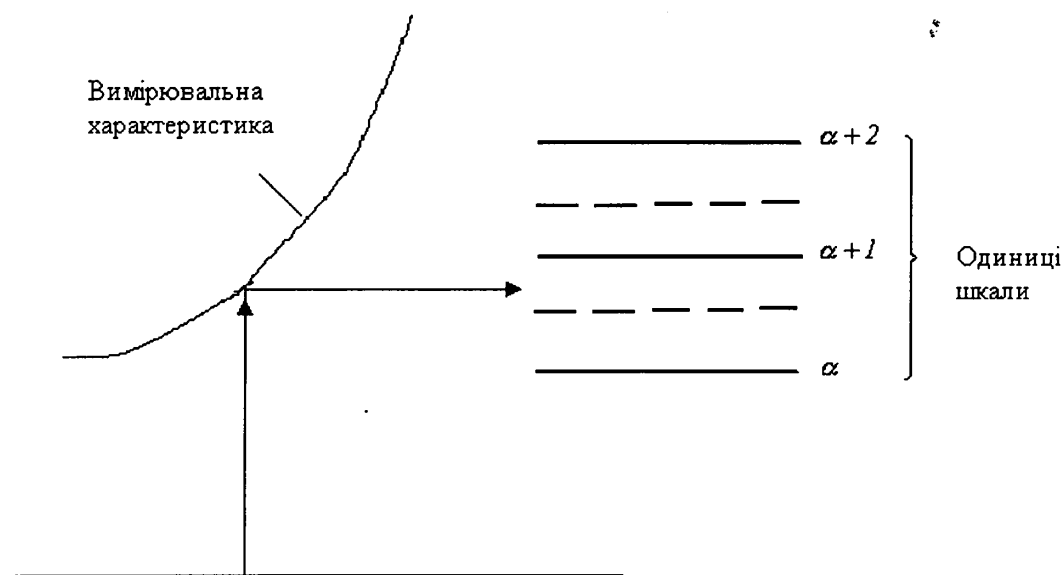


Рисунок 3.4 – До виникнення похибки квантування

3.3 Вибір методу побудови математичних моделей нагнітача

Після того, як вибрана структура математичної моделі, що описує функціональну залежність між виходом об'єкта і його входами, задача ідентифікації зводиться до обчислення коефіцієнтів рівняння регресії (3.7) за даними журналу диспетчера. Як критерій наближення рівняння регресії (3.7) до результатів спостережень $u_i, i = \overline{1, N_a}$, де u_i – вхідні величини нагнітача, що включені в залежність (3.7), використовують величину:

$$I(\hat{a}) = \sum_{i=1}^{N_a} (\tilde{y}_i - y_i)^2, \quad (3.9)$$

де \hat{a} – вектор оцінок параметрів математичної моделі (3.7);

\tilde{y}_i – значення вихідних величин, які отримані за результатами спостережень;

y_i – обчислені значення вихідної величини за рівнянням (3.7) на множині

значень вхідних величин;

N_a – кількість точок спостережень.

Критерій наближення (3.9) подамо як квадрат модуля вектора $\bar{e} = \tilde{Y} - \bar{Y}$,

$$I(\hat{a}) = |\bar{e}|^2 \text{ або } I(\hat{a}) = |\tilde{Y} - \bar{Y}|^2 = (\tilde{Y} - \bar{Y})^T (\tilde{Y} - \bar{Y}). \quad (3.10)$$

Вектор \bar{e} має компоненти $e_i, i = \overline{1, N_a}$, які можна трактувати як адитивні помилки, що покладаються на результати спостережень.

В рівнянні (3.10) \tilde{Y} – вектор спостережень, а $\bar{Y} = F\hat{a}$, де F – матриця, компоненти якої – значення поліномів $\prod_{i=1}^N u_i^{q_{is}}$, які обчислені на множині значень вхідних величин.

Якщо значення \bar{Y} підставити в критерій наближення (3.10) і мінімізувати його за вектор-змінною \hat{a} , тоді отримаємо [59]:

$$\hat{a} = CF^T \tilde{Y}, \quad (3.11)$$

де $C = M^{-1}$ – дисперсійна матриця;

$M = F^T F$ – матриця Фішера.

Оцінки параметрів моделі (3.7) отримані за формулою (3.11) шляхом мінімізації критерію наближення (3.9) носять назву метода найменших квадратів (МНК).

Числові дані, які утворюють вектор мають лише правильне число кінцевих розрядів: наступні розряди ніяк не визначені і відповідно довільні. Це характерна для практики побудови математичних моделей ситуація. Вона пов'язана з обмеженою точністю спостережень та обчислень.

Формула (3.11) отримана як розв'язок матричного рівняння:

$$M\hat{a} = F^T \tilde{Y}. \quad (3.12)$$

Якщо б вектор \tilde{Y} вимірювався точно, то оцінка \hat{a} співпадала б з його значенням \bar{a} і задовольняла б рівнянню $M\bar{a} = F^T \bar{Y}$. Оскільки $\tilde{Y} = \bar{Y} + \bar{e}$, то $\hat{a} = \bar{a} + \delta\bar{a}$. Тому рівняння (3.12) буде таким:

$$M(\bar{a} + \delta\bar{a}) = F^T (\bar{Y} + \bar{e}).$$

Відомо:

$$\bar{a} + \delta\bar{a} = CF^T (\bar{Y} + \bar{e}).$$

Оскільки $\bar{a} = CF^T \bar{Y}$, то:

$$\delta\bar{a} = CF^T \bar{e}.$$

Для оцінки величини $\delta\bar{a}$ скористаємося однією із спільних векторної і матричної норм:

$$|\delta\bar{a}| \leq |C| \cdot |F^T \bar{e}|.$$

Для визначення відносного ефекту впливу \bar{e} на визначення \hat{a} скористаємося співвідношенням:

$$|F^T \bar{Y}| \leq |M| \cdot |\bar{a}|.$$

Тоді, розділивши попередню нерівність на останню і виконавши нескладні перетворення, отримуємо

$$\frac{|\delta\bar{a}|}{|\bar{a}|} \leq |M| \cdot |C| \cdot \frac{|F^T \bar{e}|}{|F^T \bar{Y}|} \leq |M| \cdot |C| \cdot \frac{|\bar{e}|}{|\bar{Y}|}. \quad (3.13)$$

Допустимо, що збурюється матриця M на величину δM . Тоді:

$$(M + \delta M)(\bar{a} + \delta \bar{a}) = F^T \bar{Y}.$$

Звідси:

$$\delta \bar{a} = -C \delta M (\bar{a} + \delta \bar{a}).$$

Відповідно:

$$\frac{|\delta \bar{a}|}{|\bar{a} + \delta \bar{a}|} \leq |C| \cdot |\delta M|.$$

Якщо ввести відносне збурення матриці δM , то:

$$\frac{|\delta \bar{a}|}{\bar{a} + \delta \bar{a}} \leq |M| \cdot |C| \frac{|\delta M|}{|M|}. \quad (3.14)$$

Аналіз співвідношення показує, що при збуренні як матриці M , так і вектора \bar{Y} відносна зміна $\delta \bar{a}$ оцінки параметрів моделі визначається величиною $|M| \cdot |C| = |M| \cdot |M^{-1}|$. Число $|M \cdot M^{-1}|$ називають [61] числом обумовленості матриці і позначають через $cond(M)$. Це число завжди більше або рівне одиниці. $Cond(M)$ характеризує максимальний ефект від збурення \bar{Y} і M при визначенні \hat{a} . При великому $cond(M)$, як це впливає із співвідношення (3.13) і (3.14), навіть при малих збуреннях \bar{Y} і M значення \hat{a} може значно відрізнятись від свого точного значення \bar{a} . Матриця M з малим $cond(M)$ буде добре обумовленою, а з великим $cond(M)$ – погано обумовленою.

Таким чином, якщо матриця M погано обумовлена, то це може породити некоректно поставлену задачу.

Екстремальна задача

$$\min : |\bar{Y} - F\bar{a}|, \quad (3.15)$$

або [62]

$$\min : |\bar{Y} - F\bar{a}|^2,$$

відноситься до класу коректно поставлених задач, якщо розв'язок \bar{a} існує, є єдиним і неперервним від \bar{Y} і помилок спостережень та обчислень. Якщо не виконується хоча б одна із цих умов, то МНК-задача вважається некоректною. Процес перетворення некоректної задачі в коректну носить назву регуляризації задачі.

Один із шляхів регуляризації МНК-задачі - так вибрати план експерименту U , щоб матриця M була діагональною. В цьому випадку $\text{cond}(M) = 1$.

Оскільки при побудові математичних моделей нагнітача неможливо реалізувати такий план експерименту, то іншим способом регуляризації МНК – задачі є використання сингулярного розкладу матриці [62]. Ідея сингулярного розкладу полягає у тому, що матриця F подається у вигляді:

$$F = VRV^T, \quad (3.16)$$

де V, V^T – квадратні ортогональні матриці розміром $N_a \times N_a$ і $k \times k$, а R – діагональна $N_a \times k$ матриця, для якої $r_{ij} = 0$ при $i \neq j$ і $r_{ii} = r_i \geq 0$.

Величини r_i називаються сингулярними числами матриці F . Оскільки $N_a \geq k$, то маємо k - сингулярних чисел. Розв'язок задачі (3.15) з врахуванням сингулярного розкладу матриці F приводить до такого результату [50]:

$$\hat{a} = VS^{-1}U_k \tilde{Y}, \quad (3.17)$$

де S - діагональна матриця розміром $k \times k$, яка утворена із сингулярних чисел;

U_k - матриця розміром $k \times N_a$, яка утворена із матриці V^T шляхом вилучення $N_a - k$ стовпців.

Зауважимо, що формулу (3.17) можна отримати шляхом підстановки значення матриці F , яка визначається співвідношенням (3.16) в (3.11).

Дійсно $C = M^{-1}$, а $M = F^T F = (URV^T)^T (URV^T) = VR^T U^T URV^T$. Оскільки матриці U і V - ортогональні, то $U^T U = U U^T = I$, де I одинична матриця. Отже,

$M = VR^T RV^T$. Якщо R подати у вигляді блочної матриці $R = \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix}$, то

$R^T R = \begin{bmatrix} S^T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix}$. Враховуючи те, що $S^T = S$, маємо $R^T R = S^2$ і відповідно

$M = VS^2 V^T$. Тепер $M^{-1} = (VS^2 V^T)^{-1} = (V^T)^{-1} S^{-2} V^{-1}$. Знайдемо V^{-1} . Для цього скористаємося властивістю ортогональної матриці V^{-1} . Тоді $V^T V = I$. Помноживши останню рівність на V^{-1} і врахувавши, що $V V^{-1} = I$, маємо

$V^T = V^{-1}$. Відповідно $(V^T)^{-1} = (V^{-1})^{-1} = V$. Таким чином, $C = VS^{-2}V^T$. Останній результат і співвідношення (3.16) дає можливість формулу (3.11) записати в такому вигляді:

$$\hat{a} = VS^{-2}V^T VR^T U^T \tilde{Y} = VS^{-2} R^T U^T \tilde{Y}.$$

Так як

$$S^{-2} R^T = S^{-2} \cdot [S^T : 0] = S^{-2} \cdot [S : 0] = [S^{-1} : 0] = \tilde{R}^{-1},$$

то

$$\hat{a} = V\tilde{R}^{-1}U^T \tilde{Y}.$$

Останній результат можна записати і в формі рівняння (3.17).

МНК дає можливість визначити параметри математичної моделі (3.7), коли структура вибрана. Таке жорстке обмеження методу може стати на заваді при побудові конкретної моделі. Наприклад при $Q = 2$ точність моделі (3.7) може бути незадовільною, а при $Q = 3$ кількість коефіцієнтів моделі може бути надлишковою. В такій ситуації необхідно послідовно відбирати поліноми і включати їх в модель (3.7) до досягнення бажаної точності моделі.

Таку можливість надає метод, який носить назву – метод ортогоналізації [50, 59].

Ортогоналізація здійснюється послідовно. Після кожного кроку обчислень знаходять коефіцієнти моделі (3.7), які побудовані на основі ортогональних функцій. Потім за певним критерієм в математичну модель включається найкраща із функцій. В кінцевому підсумку визначаються не тільки включені поліноми в модель (3.7), а також її коефіцієнти.

Математичну модель об'єкта шукають у вигляді:

$$y = \sum_{i=1}^k b_i q_i(\bar{u}), \quad (3.18)$$

де $q_i(\bar{u})$ - система ортогональних функцій на множині точок \bar{u}_v , $v = \overline{1, N_a}$.

Ортогональні функції повинні підкорятись умові:

$$\sum_{v=1}^{N_a} q_i(\bar{u}_v) q_j(\bar{u}_v) = 0,$$

для всіх $i \neq j$.

Система ортогональних функцій обчислюється за таким рекурентним співвідношенням [50, 59].

$$q_j(\bar{u}) = f_j(\bar{u}) - \sum_{L=1}^{j-1} a_{Lj} q_L(\bar{u}), \quad j = \overline{1, k},$$

де $f_j(\bar{u})$ - поліноми, що входять в модель (3.7);

$$q_1(\bar{u}) = f_1(\bar{u}).$$

Коефіцієнти a_{Lj} вибираються таким чином, щоб забезпечити ортогональність функцій $q_j(\bar{u})$. Виходячи із цієї умови, можна отримати

$$a_{ij} = a_{ii}^{-1} [q_i f_j],$$

де для скорочення письма прийнято таке позначення для сум:

$$[q_i f_j] = \sum_{v=1}^N q_i(\bar{u}_v) f_j(\bar{u}_v).$$

А коефіцієнти a_{ii} обчислюються на основі такого рекурентного співвідношення:

$$a_{jj} = [f_j^2] - \sum_{i=1}^{j-1} a_{ij}^2 a_{ii}, \quad a_{11} = [f_1^2], \quad j = \overline{1, k}.$$

Допустимо, що в результаті спостережень за вхідними і вихідними величинами нагнітача отримані упорядковані значення $\{\bar{u}_v, \tilde{y}_v\}$ для всіх $v = \overline{1, N_a}$ точок. Тоді коефіцієнти b_i , $i = \overline{1, k}$ можна визначити шляхом мінімізації критерію наближення:

$$I(\bar{b}) = \sum_{v=1}^{N_a} \left(\tilde{y}_v - \sum_{i=1}^k b_i q_i(\bar{u}_v) \right)^2. \quad (3.19)$$

Вирішивши задачу мінімізації, знаходимо коефіцієнти:

$$b_i = a_{ii}^{-1} \left([f_i \tilde{y}] - \sum_{L=1}^{i-1} a_{Li} b_L a_{LL} \right), \quad i = \overline{1, k},$$

де $[f_i \tilde{y}] = \sum_{v=1}^{N_a} \tilde{y}_v f_i(\bar{u}_v)$.

Математична модель (3.18) малоприсаєтна для практичного використання, так як вона подана через ортогональні функції $q_i(\bar{u})$, $i = \overline{1, k}$, які визначаються за результатами експерименту. Тому бажано мати модель, як лінійну комбінацію початкових поліномів $f_i(\bar{u}) = \prod_{j=1}^N u_j^{q_{ji}}$ так, щоб її опис здійснювався за допомогою коефіцієнтів a_i , $i = \overline{1, k}$. Виходячи із цієї вимоги, можна отримати [50, 59].

$$a_i = b_i + \sum_{j=i+1}^k b_{ji} b_j, \quad i = \overline{1, k},$$

$$b_{ji} = - \left(a_{ji} + \sum_{L=j+1}^{i-1} a_{Li} b_{Lj} \right), \quad j < i.$$

Розглянемо правило відбору функцій. Нехай в рівняння моделі

$$y = \sum_{i=1}^{j-1} a_i f_i(\bar{u})$$

вже включено $j-1 < k$ поліномів з вибраної множини $\{f_i(\bar{u}), i = \overline{1, k}\}$, необхідно вибрати деякий поліном для включення його в модель. Такий поліном повинен бути найкращим, тобто таким, який максимально зменшує розбіжність між точками спостережень і розрахунковими значеннями вихідної величини в кожній із $v = \overline{1, N_a}$ точок. За міру розбіжності вибирають [50, 59] залишкову суму квадратів:

$$S_{Rj} = \sum_{v=1}^{N_a} (\tilde{y}_v - y(\bar{b}, \bar{u}_v))^2,$$

де $y(\bar{b}, \bar{u}_v) = \sum_{i=1}^j b_i q_i(\bar{u}_v)$.

Мінімізація S_R приводить до такого результату:

$$S_R = [\tilde{y}^2] - \sum_{i=1}^j b_i^2 a_{ii}, \quad (3.20)$$

де $[\tilde{y}^2] = \sum_{v=1}^{N_a} \tilde{y}_v^2$

Величину S_R зручно обчислювати за рекурентним співвідношенням, яке легко отримати із (3.20):

$$S_{Rj} = S_{R,j-1} - V_j,$$

$$V_j = b_j^2 a_{jj},$$

де $S_{R0} = [\tilde{y}^2]$.

Величина V_j характеризує приріст точності, що залежить тільки від вибраної функції, яка використовується для побудови ортогонального базису на j -ому кроці обчислень. Тому величина V_j використовується як критерій відбору чергового полінома для включення його в модель (3.7) на j -ому кроці обчислень.

Процедуру включення поліномів в рівняння моделі доцільно закінчувати тоді, коли величина V_j стане менше деякої малої додатної величини ε , або коли вклад V_j в залишкову суму квадратів буде статично незначним [59].

Якщо відома оцінка дисперсії спостережень $s_j^2 = S_{Rj} / \varphi_j$ з числом степенів свободи $\varphi_j = N_a - j$, то можна розрахувати величину $F_j = V_j / s_j^2$. Ця величина при допущенні нормальності розподілу похибок спостережень підпорядкована F -розподілу з числом степенів свободи $\tilde{\varphi}_1 = 1$ і $\tilde{\varphi}_2 = \varphi_j$. Задавшись порогом значимості α , знаходять $F_{np} = F^{-1}(\alpha, \varphi_1, \varphi_2)$. Включення поліномів у модель (3.7) закінчуються, коли $F_j < F_{np}$.

3.4 Обробка результатів спостережень та побудова емпіричних моделей нагнітача

Богородчанське ЛВУМГ є газовим вузлом з трьома компресорними цехами КС-39 “Прогрес”, КС-21 “Союз”, і КС-39 “УПУ”, які відповідно оснащені такими типами нагнітачів: 650-21, RF-2ВВ-30, PCL-804. Вимірюються витрати кожного із газових потоків, які поступають на кожну компресорну

групу (цех), а також добові витрати газу, що необхідні для роботи газотурбінних агрегатів. На КС-39 “Прогрес” встановлений електричний привід, де ведеться облік спожитої електроенергії.

Оскільки кожному із цехів ведеться сумарний облік газу, що перекачується, і сумарні витрати паливного газу, то при створенні математичних моделей ГПУ робилося допущення, що статичні характеристики однотипних нагнітачів є ідентичні. Тому для кожної групи нагнітачів визначались усереднені значення як вхідних, так і вихідних величин.

Слід відмітити, що в процесі компримування газу в кожному із цехів працюють не всі ГПА із наявної кількості, а тільки їх частина. Кількість працюючих агрегатів залежить в основному від пори року.

Природно, що з падінням температури навколишнього середовища кількість працюючих агрегатів, як правило, збільшується.

Ознакою працюючого агрегату є відмінність від нуля частоти обертання нагнітача.

Як видно із рис. 2 і 3 частина параметрів, які характеризують роботу КС, знімають через 2 години, а іншу частину параметрів 2 рази на добу; такі дані заносять в журнал диспетчера.

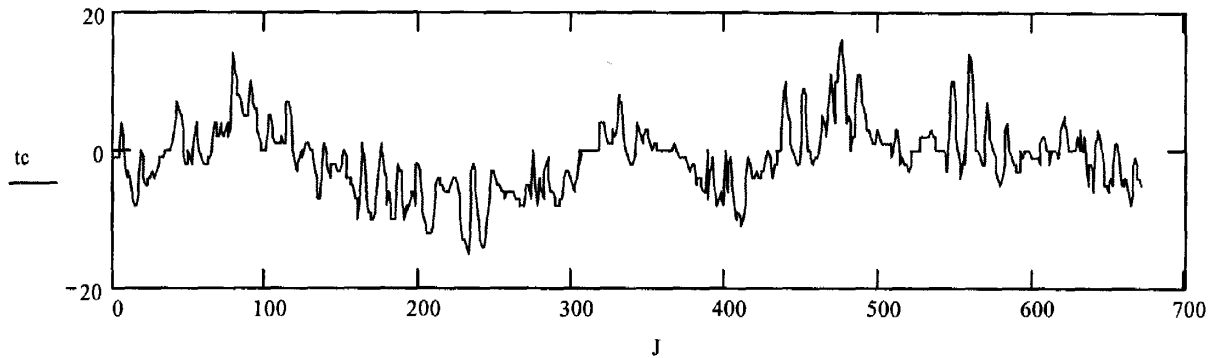
Позначимо через x_{ijs} , будь-який параметр, який характеризує роботу ГПА, і нехай K_s - кількість однотипних нагнітачів в цеху, що працюють в момент зняття диспетчером відліків приборів. Тоді усереднене значення параметра за

кількістю однотипних агрегатів буде таким: $\hat{x}_{ij} = \frac{\sum_{s=1}^{K_s} x_{ijS}}{K_s}$.

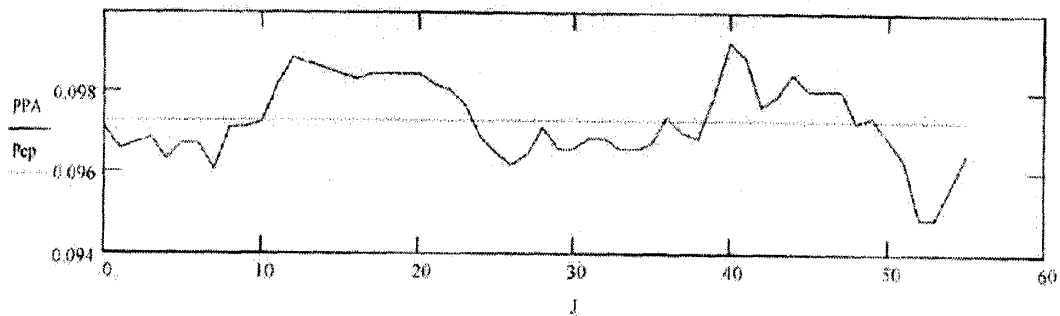
При добовому усередненні значення \hat{x}_{ij} підсумовують і результат ділять на кількість відліків n_i ($n_i = 12$ або $n_i = 2$) (усереднення за кількістю

відліків) $\hat{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}}{n_i}$.

На рис. 3.5 – 3.12 показані приклади графіків технологічних параметрів, що характеризують роботу цеху КС – 21 “Союз” (значення усереднене). На осі абсцис відкладені номери замірів відповідних параметрів. Із графіків видно, що зміна значень технологічних параметрів, є досить значною, що підтверджує табл. 3.1.



а)



б)

Рисунок 3.5 - Температура (а) та тиск (б) навколишнього повітря за період з 01.01.2001 по 23.02.2001 (КС-21 "СОЮЗ")

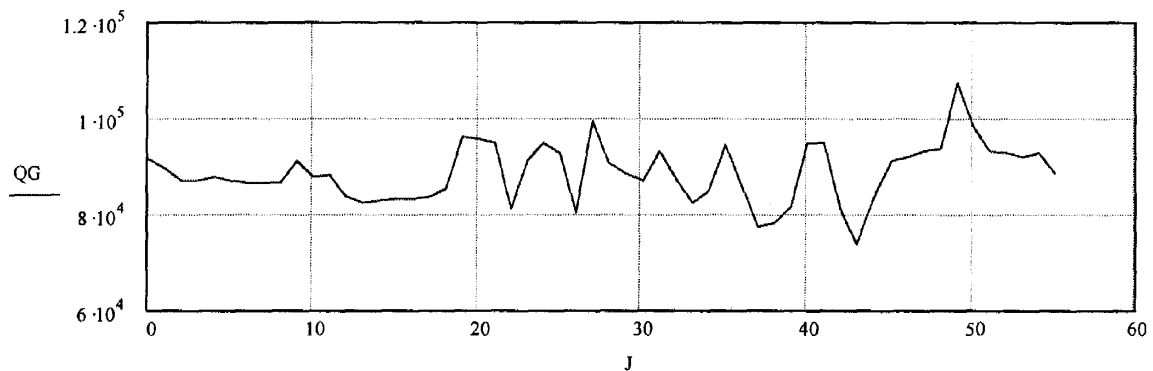


Рисунок 3.6 – Усереднена (за кількістю однотипних компресорів і за кількістю відліків) продуктивність нагнітача RF – 2ВВ – 30

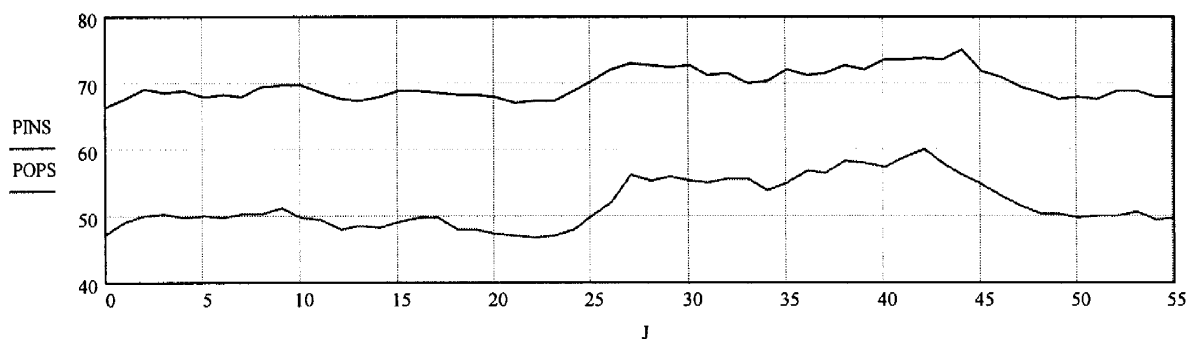


Рисунок 3.7 – Усереднені (за кількістю однотипних компресорів і за кількістю відліків) значення тисків на вході і виході КС-21 "СОЮЗ"

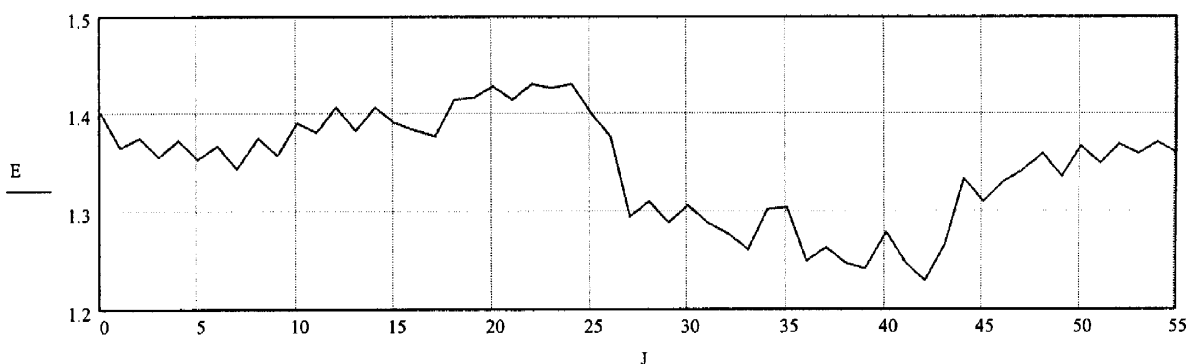


Рисунок 3.8 – Усереднені (за кількістю однотипних компресорів і за кількістю відліків) значення степені стискування газу КС-21 "СОЮЗ"

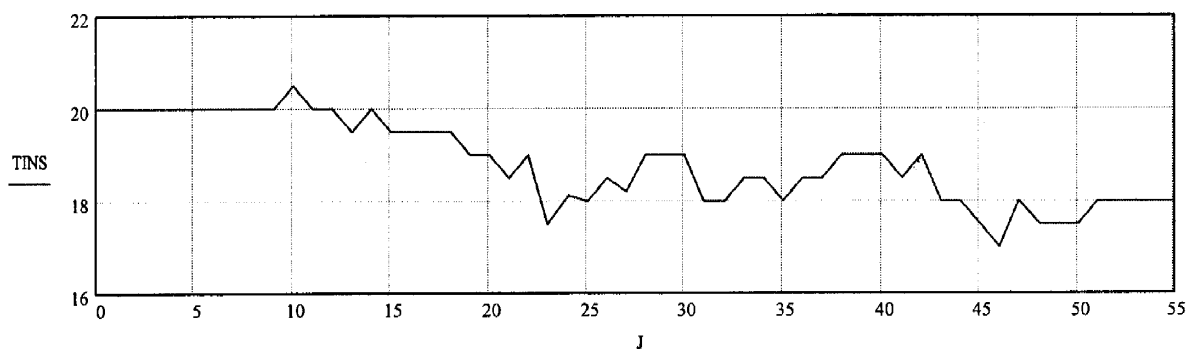


Рисунок 3.9 – Усереднені (за кількістю однотипних компресорів і за кількістю відліків) значення температури газу на вході КС-21 "СОЮЗ"

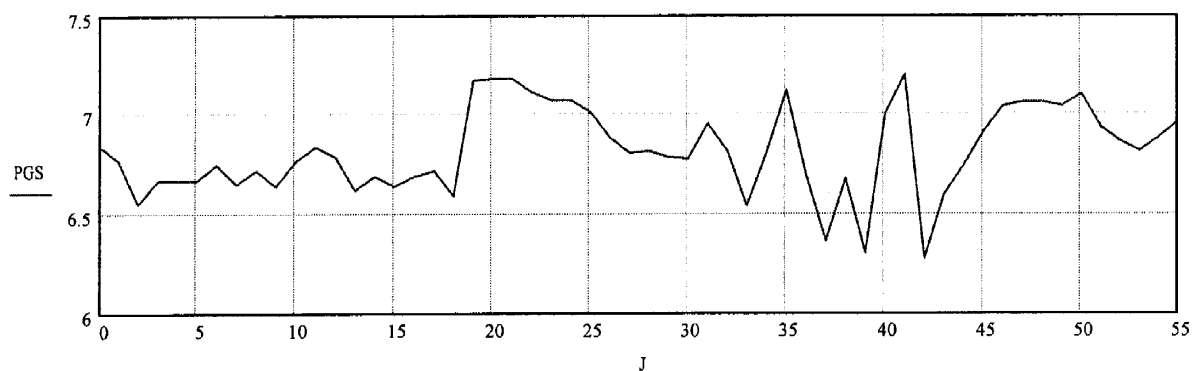


Рисунок 3.10 – Усереднені (за кількістю однотипних компресорів і за кількістю відліків) значення тиску паливного газу (КС-21 "СОЮЗ")

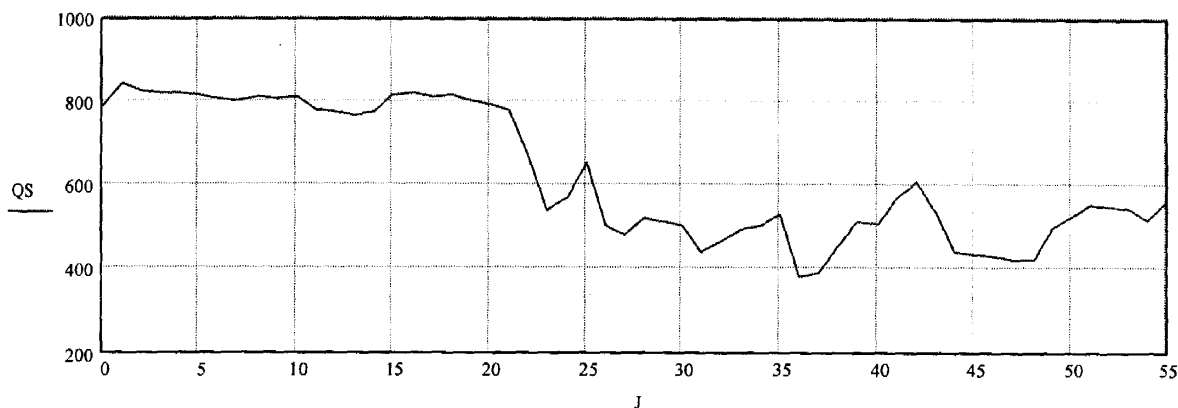


Рисунок 3.11 – Усереднені (за кількістю однотипних компресорів і за кількістю відліків) значення витрати паливного газу (КС-21 "СОЮЗ")

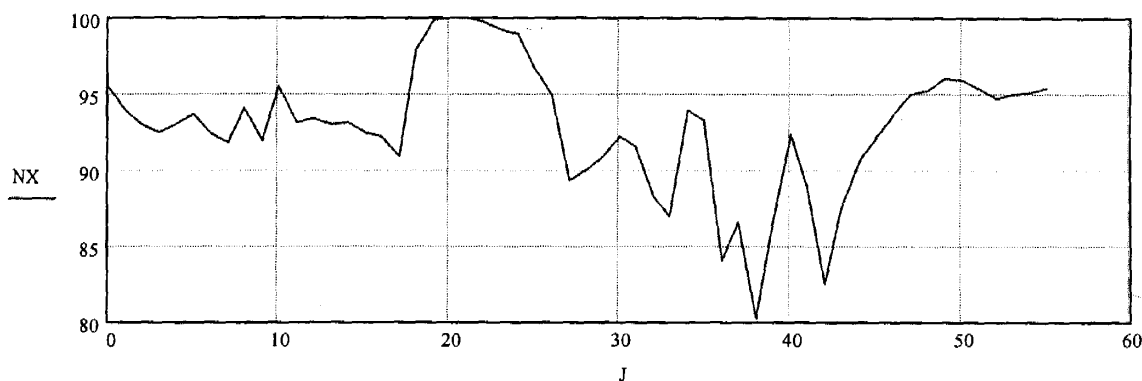


Рисунок 3.12 – Усереднені (за кількістю однотипних компресорів і за кількістю відліків) значення відносної частоти обертання вала нагнітача (КС-21 "СОЮЗ")

Відмітимо, що моделі (3.2) – (3.6) будуть дійсні тільки для тих діапазонів зміни вхідних величин, для яких вони отримані.

Програми обробки результатів спостережень написані в середовищі Mathcad і наведені в додатках.

Результатом роботи програми є масиви даних для обчислення коефіцієнтів математичних моделей типу (3.7). Ці масиви подані як вектор вихідних величин і матриця вхідних величин (матриця спостережень).

Таблиця 3.1 – Максимальне відхилення режимних параметрів від їх середніх значень для нагнітача RF – 2ВВ – 30 (КС –21 “ Союз “).

Назва параметру	Середнє значення	Середньо квадратичне відхилення	Макс. відхилення		Діапазон зміни ТП, %
			абсолютне	у відсотках	
Продуктивність нагнітача, $н.м^3/хв$	$8.85 \cdot 10^4$	$6.114 \cdot 10^4$	$1.893 \cdot 10^4$	21.4	38.3
Тиск газу на вході в нагнітач, МПа	5.17	0.219	0.81	15.7	25.3
Степінь стискування газу	1.345	0.056	0.116	8.6	14.9
Температура газу на вході в нагнітач, °С	18.83	0.907	1.83	9.7	18.6
Тиск паливного газу, МПа	0.68	0.022	0.055	8.1	13.7
Витрата паливного газу, $н.м^3/хв$	623.6	156.1	241.8	38.8	73.9
Температура навколишнього сер-ща, °С	-1.18	4.07	8.49	74.2	16.21
Атмосферний тиск навколишнього середовища, мм. рт. ст..	731,08	7,47	15,92	2,2	4,7
Відносна швидкість обертання валу нагнітача, %	92.86	4.18	12.712	13.7	21.4

Після того як вибрана структура моделей нагнітача (3.2) - (3.6) у вигляді полінома (3.7) задача ідентифікації зводиться до визначення степені полінома Q та коефіцієнтів $a_s, s=1, \overline{k}$. Від вибору степеня полінома Q залежить кількість коефіцієнтів математичної моделі (3.7). Наприклад, при $Q = 1$; $k = N + 1$, де N – кількість вхідних величин. Якщо, наприклад, $N=5$, то при $Q = 2$, $k = 21$; при

$Q=3$, $k=56$, а при $Q=4$, $k=126$. Видно, що із збільшенням показника Q кількість коефіцієнтів моделі швидко зростає. Тому потрібно вибрати розумний компроміс між значенням Q і точністю моделі. З іншої сторони, величина Q може бути обмежена і кількістю спостережень N_a , оскільки $k \leq N_a$. У випадку, коли $k = N_a$ задача обчислення коефіцієнтів математичної моделі зведеться до системи лінійних рівнянь з k - невідомими і тоді апроксимація буде виконана точно, але це не значить, що отримана математична модель буде правильно відтворювати об'єктивно існуючі функціональні зв'язки між вихідною і вхідними величинами. Тому при побудові математичних моделей нагнітача завжди виконувалась умова $k < N_a$.

Аналіз результатів моделювання показав, що весь масив спостережень доцільно розбити на чотири підмасиви, кожний із яких відповідає певній порі року – зима, весна, літо, осінь. Таке розбиття дає можливість підвищити точність моделі і обійтись меншим значенням показника полінома Q .

Оскільки отримані математичні моделі нагнітачів будуть використовуватись в задачі оптимізації, то важливо отримати не тільки коефіцієнти рівняння (3.7), а й степені поліномів при цих коефіцієнтах. Показники q_{is} поліномів

$$P_s(\bar{u}) = \prod_{i=1}^N u_i^{q_{is}}, \quad s = \overline{1, k} \quad (3.21)$$

будемо формувати у вигляді матриці показників Q_p , яка буде мати таку структуру:

	1	2	3	...	s	...	k
u_1	q_{11}	q_{12}	q_{13}	...	q_{1s}	...	q_{1k}
u_2	q_{21}	q_{22}	q_{23}	...	q_{2s}	...	q_{2k}
...
u_N	q_{N1}	q_{N2}	q_{N3}	...	q_{Ns}	...	q_{Nk}

Перший стовпець матриці Q_p - показники степенів першого полінома $P_1(\bar{u})$, другий стовпець – показники степенів другого полінома $P_2(\bar{u})$ і т.д. Серед

показників полінома можуть бути і нульові, при цьому для кожного стовпця повинна виконуватись умова $\sum_{i=1}^N q_{is} \leq Q, s = \overline{1, k}$.

Вибір степені Q системи поліномів (3.21), які входять в рівняння (3.7), здійснюється шляхом послідовного вибору степені Q , починаючи з найнижчої, до досягнення необхідної точності апроксимації.

Необхідно відмітити, що МНК-метод і його модифікація метод сингулярного розкладу, після вибору Q , дають можливість визначити коефіцієнти a_s за умови, що їх кількість фіксована. Така ситуація не завжди може задовольнити дослідника. По-перше, вплив деяких вхідних величин може бути незначним і їх бажано не включати в модель. Процедура вилучення коефіцієнтів, значення яких близьке до нуля, полягає в тому [59], що висувають гіпотезу про рівність нулю вибраного коефіцієнта і якщо така гіпотеза має місце, то роблять допущення про рівність нулю цього коефіцієнта. Це означає, що з рівняння регресії (3.7) вилучається відповідний поліном. Ця операція є досить громіздкою і погано піддається формалізації.

По-друге, вибравши Q , отримуємо математичну модель (3.7) з певним числом поліномів типу (3.21), але може виявитись, що рівняння регресії (3.7) з вибраним Q не забезпечує необхідної точності апроксимації. Тоді необхідно збільшувати Q , але при цьому може виявитись, що не виконується умова $k \leq N_a$.

Як в першому, так і в другому випадках альтернативою може бути метод ортогоналізації, який дає можливість включити в модель не всі поліноми (3.21), а тільки їх частину, яка визначається необхідною точністю апроксимації.

Для обчислення матриці показників Q_p , складалась матриця рядок $[0, 1, 2, \dots, Q]$ із якої шляхом перестановки елементів генерувалась матриця розміром $(Q + 1) \times (Q + 1)$.

Із утвореної матриці вилучались стовпці з однаковими елементами. В результаті такої процедури були сформовані матриці Q_p для $Q = 2$, $Q = 3$ і $Q = 4$. Використовувати поліноми більш високих порядків недоцільно.

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.

Приклади програм, які реалізують алгоритми обчислень коефіцієнтів математичної моделі (3.7) і матриць показників Q_p у відповідності з вибраними методами, наведені в додатках Д і Ж. Програми для інших моделей ідентичні, різниця лише в операторах вводу і виводу.

При обчисленні коефіцієнтів моделей 9-12 (див. табл. 2) для значення $Q = 4$ матриця M дуже погано обумовлена. Для покращення обумовленості матриці M вхідні величини моделі приведені до безрозмірного вигляду за такою формулою:

$$u_i = \frac{U_i - U_{i,\min}}{U_{i,\max} - U_{i,\min}}, \quad i = \overline{1, N},$$

де U_i - розмірна вхідна величина;

$U_{i,\min}, U_{i,\max}$ - відповідно її мінімальне і максимальне значення.

Результатами обчислень є коефіцієнти $a_s, s = \overline{1, k}$ математичної моделі (3.7) і матриці показників Q_p вибраних поліномів (3.21). В табл. 3.3 наведені результати таких обчислень. Для оцінки точності моделі може служити величина

$$\delta_i, \% = \frac{\tilde{y}_i - y_i}{\tilde{y}_i} \cdot 100\%, \quad i = \overline{1, N_a},$$

де \tilde{y} - експериментальні значення вихідної величини;

y - обчислені значення вихідної величини у відповідності з рівнянням математичної моделі.

Така оцінка є точковою і не завжди приводить до правильних висновків. Оскільки в цілому задовільна апроксимація результатів спостережень може мати в окремих точках, з тих чи інших причин, відносні значні відхилення від середніх значень. Такі похибки можуть виникнути як результат суб'єктивних промахів при заповненні журналу оператора; від асинхронності записів даних; від неправильного вибору точок контролю, наприклад, витрати і т.д.

Таблиця 3.2 – Результати ідентифікації процесу компримування газу

Назва математичної моделі	N	Q	МНК-метод		МНК-метод з сингулярним розкладом $\delta, \%/k_{y\bar{y}}$	Q	Метод ортогоналізації	
			Кількість коефіцієнтів	$\frac{\delta, \%}{k_{y\bar{y}}}$			Кількість коефіцієнтів	$\frac{\delta, \%}{k_{y\bar{y}}}$
Витрата паливного газу (нагнітач RF-2BB-30 КС-21 “Союз”)	6	2	28	$\frac{3.31}{0.76}$	$\frac{3.31}{0.76}$	3	52	$\frac{0.61}{0.99}$
Температури газу на виході із нагнітача RF-2BB-30 (КС-21 “Союз”)	6	2	28	$\frac{1.63}{0.95}$	$\frac{1.63}{0.95}$	2	19	$\frac{1.65}{0.907}$
Температури вихлопних газів (нагнітач RF-2BB-30 КС-21 “Союз”)	4	4	70	$\frac{13.06}{0.95}$	$\frac{1.03}{0.97}$	3	35	$\frac{1.05}{0.911}$
Продуктивність нагнітача RF-2BB-30 (КС-21 “Союз”)	6	2	28	$\frac{15.5}{0.71}$	$\frac{15.5}{0.71}$	3	28	$\frac{3.27}{0.97}$
Витрата паливного газу (нагнітач PCL-804 КС-39 “Прогрес”)	6	2	28	$\frac{0.97}{0.85}$	$\frac{0.97}{0.89}$	3	26	$\frac{0.82}{0.82}$
Температура газу на виході із нагнітача PCL-804 (КС-39 “УПУ”)	5	2	21	$\frac{0.71}{0.9}$	$\frac{0.71}{0.9}$	2	14	$\frac{1.05}{0.61}$
Температура вихлопних газів (нагнітач PCL-804 КС-39 “УПУ”)	5	4	70	$\frac{48.7}{0.50}$	$\frac{1.36}{0.84}$	3	18	$\frac{1.67}{0.78}$
Продуктивність нагнітача PCL-804, КС-39 “УПУ”	5	2	21	$\frac{1.08}{0.91}$	$\frac{1.08}{0.91}$	3	17	$\frac{1.03}{0.82}$
Потужність приводу нагнітача 650-21 (КС-39 “Прогрес”)	4	3	35	$\frac{1.71}{0.97}$	$\frac{1.71}{0.97}$	3	30	$\frac{1.73}{0.94}$
Продуктивність нагнітача 650-21 (КС-39 “Прогрес”)	4	4	70	$\frac{7.07}{0.85}$	$\frac{7.05}{0.65}$	4	35	$\frac{7.86}{0.33}$
Температура на виході нагнітача 650-21 (КС-39 “Прогрес”)	5	3	56	$\frac{1.69}{0.83}$	$\frac{1.68}{0.83}$	3	34	$\frac{1.84}{0.79}$
Струм приводу нагнітача 650-21 (КС-39 “Прогрес”)	3	4	35	$\frac{2.075}{0.87}$	$\frac{2.075}{0.67}$	4	33	$\frac{2.76}{0.63}$

В цій ситуації доцільно використовувати не точковий, а інтегральний

показник $\delta_{cp}, \% = \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} |\delta_i, \%|$. Величина $\delta_i, \%$ взята за модулем, щоб виключити

взаємне компенсування додатних і від’ємних значень величин δ_i .

Інший спосіб оцінки точності моделі, це обчислення кореляційного зв'язку між величинами \tilde{y}_i і y_i . При точному співпаданні значень \tilde{y}_i і y_i , на координатній площині \tilde{y}, y будемо мати пряму лінію (рис.3.13). У випадку, коли дані спостережень апроксимовані з певною похибкою будемо мати відхилення точок на площині (\tilde{y}, y) від прямої лінії (див. рис.3.13).

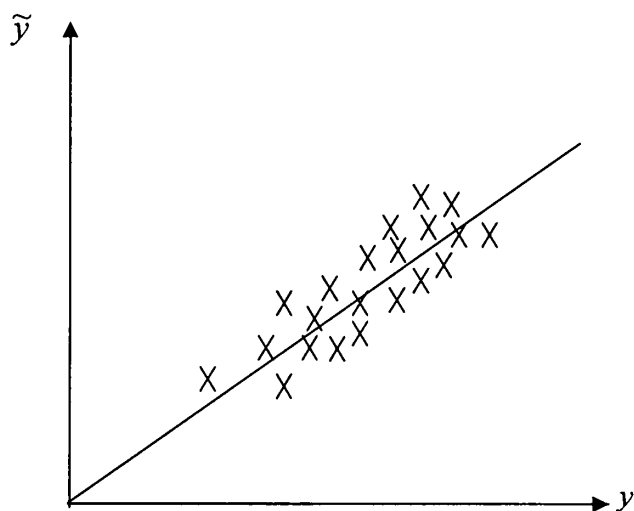


Рисунок 3.13 – До визначення точності математичної моделі

У випадку точного співпадання значень \tilde{y} і y коефіцієнт кореляції $k_{\tilde{y}y}$ дорівнює одиниці. При відхиленні таких значень від прямої лінії значення коефіцієнта кореляції $k_{\tilde{y}y}$ буде менше одиниці. Чим більше розсіювання, тим менша точність апроксимації і відповідно менший коефіцієнт кореляції.

Коефіцієнт кореляції між величинами \tilde{y} і y будемо обчислювати за такою формулою [49]:

$$k_{\tilde{y}y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} (\tilde{y}_i - \tilde{\bar{y}}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^{N_a} (\tilde{y}_i - \tilde{\bar{y}})^2 \sum_{i=1}^{N_a} (y_i - \bar{y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.22)$$

$$\text{де } \tilde{\bar{y}} = \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} \tilde{y}_i;$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} y_i \text{ - середні значення величин } \tilde{y} \text{ і } y.$$

Як випливає із (3.22) при $y_i = \tilde{y}_i, i = \overline{1, N_a}, k_{\tilde{y}y} = 1$.

Аналіз табл.3.3 показує, що МНК-метод і МНК-метод з сингулярним розкладом матриці F дають однакові результати при $Q = 2$ і $Q = 3$. Відмінність результатів обчислень за цими методами з'являється лише при $Q = 4$. Характерним є те, що в окремих випадках обчислення параметрів моделі за названими методами оцінка точності моделі за критерієм $k_{\bar{y}}$ дає приблизно однакові результати. Це пояснюється тим, що в першому і другому випадках коефіцієнти моделі (3.7) мають однакові значення крім коефіцієнта a_0 , при якому функція $f_0(\bar{u}) \equiv 1$. Це приводить до паралельного зсуву лінії регресії по відношенню до лінії регресії, яка отримана за МНК-методом за сингулярним розкладом матриці F . Приклади графіків залежності (3.7) та кореляційного зв'язку між величинами показані на рис. 3.14 і 3.15.

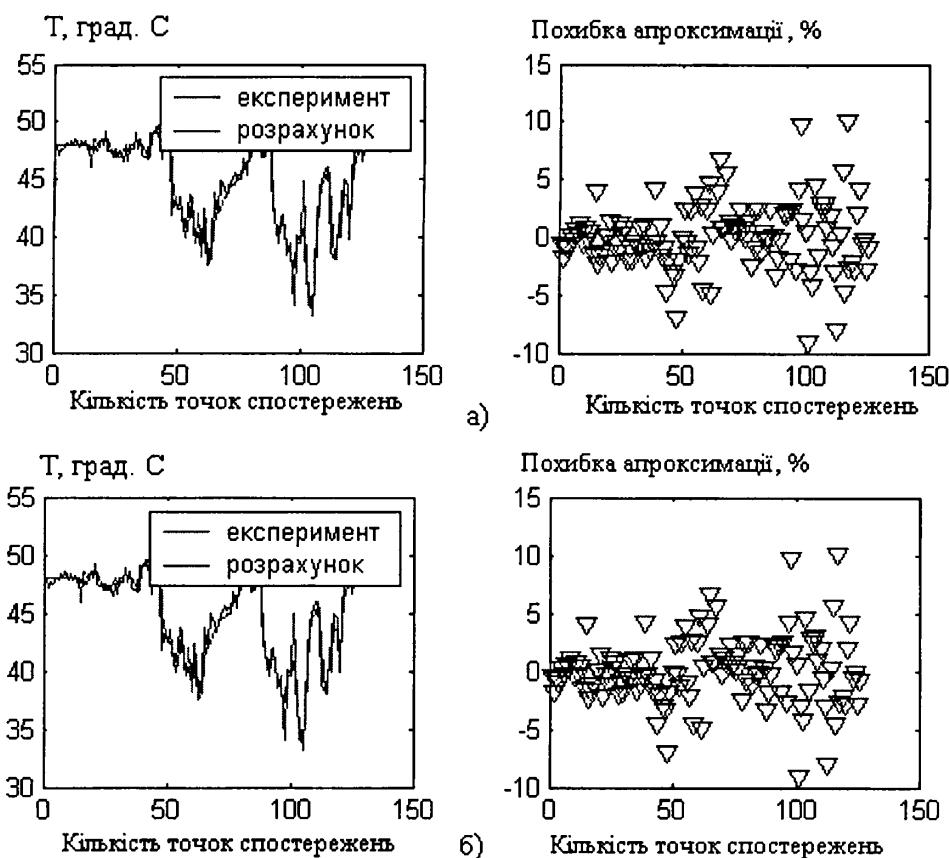


Рисунок 3.14 - Приклад апроксимації результатів спостережень рівнянням регресії (вихідна величина - температура газу на виході. Нагнітач RF-2ВВ-30, КС - 21 "СОЮЗ")

а) МНК-метод;

б) МНК-метод з сингулярним розкладом матриці F .

При виборі математичної моделі приймалися до уваги такі критерії відбору:

- мінімальне значення середньої похибки апроксимації;
- мінімальне значення коефіцієнта кореляції $k_{\bar{y}y}$;
- мінімальна кількість коефіцієнтів

Якщо виявлялося, що три методи забезпечують близькі результати за точністю, то перевагу мала математична модель з мінімальним числом коефіцієнтів.

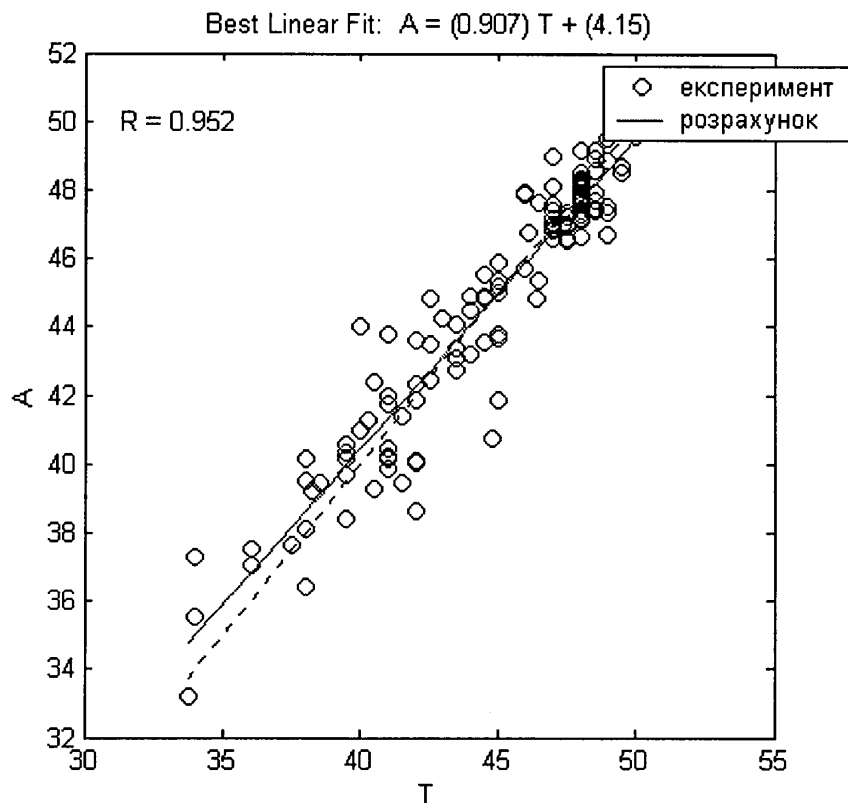


Рисунок 3.15 - Кореляційний зв'язок між величинами \bar{y} і y
(вихідна величина - температура газу на виході.
Нагнітач RF-2BB-30, КС - 21 "СОЮЗ")

3.5. Дослідження можливостей нейромереж для побудови математичних моделей нагнітачів

Для побудови емпіричної моделі можна використати метод регресивного аналізу, в основі якого лежить теорія оптимального експерименту.

Трудомісткість методу побудови емпіричної моделі в значній степені залежить від структури залежності $\bar{\varphi}(\bar{u})$ і від того, яким чином вибрано план

експерименту. Задача ускладнюється тим, що для кожного класу моделей існує свій оптимальний план [63]. Складність плану зростає зі складністю емпіричної моделі.

На відміну від методу регресивного аналізу ефективність розв'язку задачі ідентифікації з використанням нейронних мереж не залежить від вибраного плану експерименту. З іншої сторони, для побудови емпіричної моделі необхідна навчальна вибірка пар вхідних і вихідних величин певного об'єму.

В загальному випадку задачу ідентифікації можна звести до реалізації деякого складного функціонального багатовимірного перетворення [64]. В результаті відображення $U \rightarrow Y$ необхідно забезпечити формування адекватних вихідних сигналів у відповідності із всіма прикладами навчальної вибірки і зі всіма можливими вхідними сигналами, які не ввійшли до навчальної вибірки. Друга умова значно ускладнює формування навчальної вибірки. В загальному випадку ця задача не розв'язана, але в кожному конкретному випадку можна знайти її часткове вирішення.

В основі розв'язку задачі ідентифікації лежить теорема Хехт-Нільсена, яка доказує можливість апроксимації експериментальних даних функцією багатьох змінних достатньо загального вигляду за допомогою двошарової нейромережі з прямими повними зв'язками. Така мережа має n нейронів у вхідному шарі, $2n+1$ нейрон в прихованому шарі з наперед відомими функціями активації (наприклад, сигмоїдальними) і m нейронів у вихідному шарі з невідомими функціями активації.

Ця теорема є неконструктивною, оскільки вона визначає тільки представлення будь-якої багатовимірної функції кількох змінних за допомогою нейромережі фіксованого розміру. Невідомими залишаються характеристики функції активації прихованого шару та вид функції активації нейронів вихідного шару.

На практиці вимоги теореми Хехт-Нільсена до функцій активації задовольняють наступним чином. В нейронах прихованого шару використовують сигмоїдальні функції, а для нейронів вихідного шару вибирають лінійні функції

активації. В процесі навчання індивідуально для кожного нейрона визначають його параметри.

На рис. 3.16 показана нейромережа для ідентифікації статичних характеристик багатовимірного об'єкта.

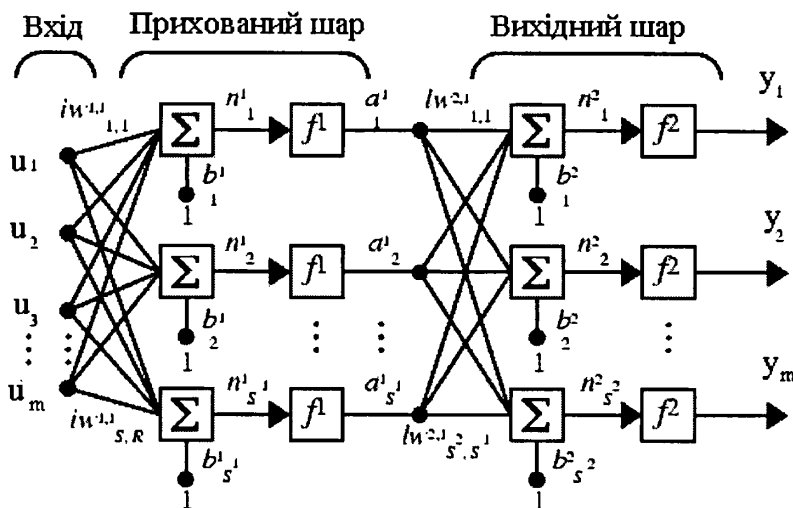


Рисунок 3.16–Нейромережа ідентифікації багатовимірного об'єкта.

Основною складовою нейромережі є нейрон, який має таку математичну модель:

$$n_j^{(i)} = \sum_{r=1}^{S_i} w_{j,r}^{(i)} \cdot n_r^{(i-1)} + b_j^{(i)}, \quad j = \overline{1, S_i} \quad (3.23)$$

де $w_{j,r}^{(i)}$ – вага (weight) синапса;

S_i – кількість нейронів в i -тому шарі;

$n_r^{(i-1)}$ – вхідний сигнал r -го нейрона;

$b_j^{(i)}$ – значення зміщення (bias).

Зміщення $b_j^{(i)}$ подібне до ваги синапса $w_{j,r}^{(i)}$, але має одиничний вхідний сигнал (рис. 3.16).

Рівняння (3.23) можна об'єднати в одне векторно-матричне:

$$\vec{n}^{(i)} = W^{(i)} \vec{n}^{(i-1)} + \vec{b}^{(i)} \quad (3.24)$$

де $W^{(i)}$ – матриця ваг синапсів розміром $S_i \times S_{i-1}$.

Сигнал $n_j^{(i)}$ j -го нейрона перетворюється функцією активації $f_j^{(i)}$ у вихідний сигнал нейрона $a_j^{(i)} = f_j^{(i)}(n_j^{(i)})$, або у векторній формі $\bar{a}^{(i)} = \bar{f}^{(i)}(\bar{n}^{(i)})$.

Якщо врахувати рівняння (3.24), то

$$\bar{a}^{(i)} = \bar{f}^{(i)}\left(W^{(i)}\bar{n}^{(i-1)} + \bar{b}^{(i)}\right). \quad (3.25)$$

Рівняння (3.25) є математичною моделлю i -го шару нейромережі.

При створенні архітектури нейромережі розрізняють вагові вхідні матриці і вагові матриці шару, що є з'єднувальною ланкою між двома шарами. Для вхідних матриць використовують позначення $IW^{(l,l)}$, а для матриць шару – $LW^{(i,i-1)}$, де i -номер шару, а $i-1$ – номер векторного входу для i -го шару.

Використовуючи прийнятну систему позначень, нейронну мережу можна подати у спрощеному вигляді (рис. 3.17), який значно полегшує синтез багатозарових нейромереж.

Математична модель нейромережі, що показана на рис. 3.17, може бути описана такою системою рівнянь:

$$\bar{a} = \bar{f}^{(1)}\left(IW^{(1,1)}\bar{p}^{(1)} + b^{(1)}\right), \quad (3.26)$$

$$\bar{y} = \bar{a}^{(2)} = \bar{f}^{(2)}\left(LW^{(2,1)}\bar{a}^{(1)} + \bar{b}^{(2)}\right) \quad (3.27)$$

Якщо із рівнянь (3.26) і (3.27) вилучити проміжну змінну, то отримуємо рівняння, яке апроксимує функціональне перетворення $U \rightarrow Y$

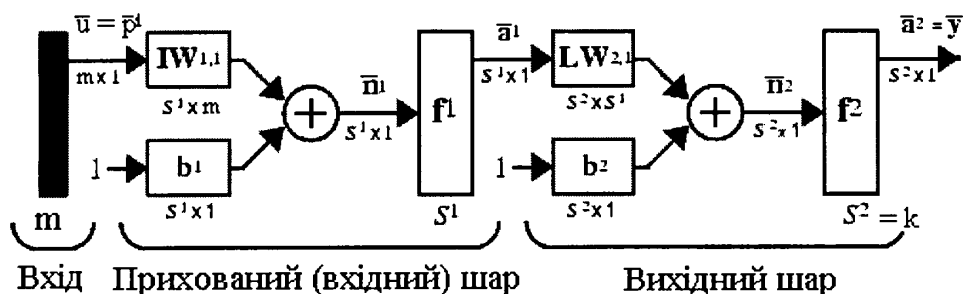


Рисунок 3.17 – Спрощена схема нейромережі.

$$\bar{y} = \bar{f}^{(2)}\left(LW^{(2,1)}\bar{f}^{(1)}\left(IW^{(1,1)}\bar{u} + b^{(1)}\right) + \bar{b}^{(2)}\right) \quad (3.28)$$

Вихідними функціями активації $f_j^{(2)}$, $j = \overline{1, k}$ є лінійна функція, яка, наприклад, в системі MatLAB позначається як *purelin*, тобто

$$\bar{y} = \text{purelin}\left(LW^{(2,1)}\bar{a}^{(1)} + \bar{b}^{(2)}\right)$$

Функції активації $f_j^{(1)}$, $j = \overline{1, S_1}$ вибирають як сигмоїдальну, вихід якої змінюється в межах $[-1; 1]$. В системі MatLAB вона позначається як *tansig*. Наприклад, якщо використовувати функцію *tansig*, то рівняння (3.26) набуде такого вигляду:

$$\bar{a} = \text{tansig}\left(IW^{(1,1)}\bar{p}^{(1)} + b^{(1)}\right)$$

Тепер математична модель нейромережі в термінах системи MatLAB буде такою:

$$\bar{y} = \text{purelin}\left(LW^{(2,1)} \cdot \text{tansig}\left(IW^{(1,1)}\bar{u} + \bar{b}^{(1)}\right) + \bar{b}^{(2)}\right) \quad (3.29)$$

Основна ідея щодо нейромереж полягає в тому, що параметри $w_{j,r}^{(i)}$ і $b_j^{(i)}$ необхідно відрегулювати так, щоб мережа із заданою точністю апроксимувала функціональне перетворення $U \rightarrow Y$. Це досягається шляхом навчання нейромережі.

Для навчання нейромережі-апроксиматора (3.29) застосовують алгоритм зворотного поширення похибки [64].

В алгоритмі зворотного поширення обчислюється вектор градієнта поверхні похибки, що приводить до різних обчислювальних схем, таких як метод спряжених градієнтів, метод Ньютона, Левенберга-Маркуардта та ін [61].

Одна із проблем, що може виникнути під час навчання нейромережі – це неприйняття [64]. Суть цієї проблеми в тому, що мережа може бути досить добре навчена на навчальній послідовності, тобто середньоквадратичне відхилення між виходом мережі і експериментальними даними має дуже мале значення, але, коли нові дані представлені, що не входять до навчальної послідовності, похибка стає

великою. Один із способів усунення неприйняття – це збільшення розмірності нейромережі. Інший спосіб – це регуляризація, коли мінімізується функція

$$E = \gamma \cdot e + (1 - \gamma)e_w$$

$$\text{де } e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2; \quad e_w = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j^2;$$

\tilde{y}_i – експериментальні значення вихідних величин об'єкта;

y_i – вихід нейромережі;

N – довжина навчальної послідовності;

w_j – ваги нейрона.

Дослідження показали, що регуляризація значно зменшує несприйнятливості мережі, але при цьому зростають затрати часу на її навчання.

З точки зору усунення несприйнятливості більш ефективними є радіальні мережі, які, на відміну від мереж зі зворотним поширенням, вимагають більшої кількості нейронів.

Основою радіальних мереж є функція *radbas* (Radial Basis Neuron)

$$\text{radbas}(n) = \exp(-n^2).$$

Модель нейрона радіальної мережі показана на рис. 3.18.

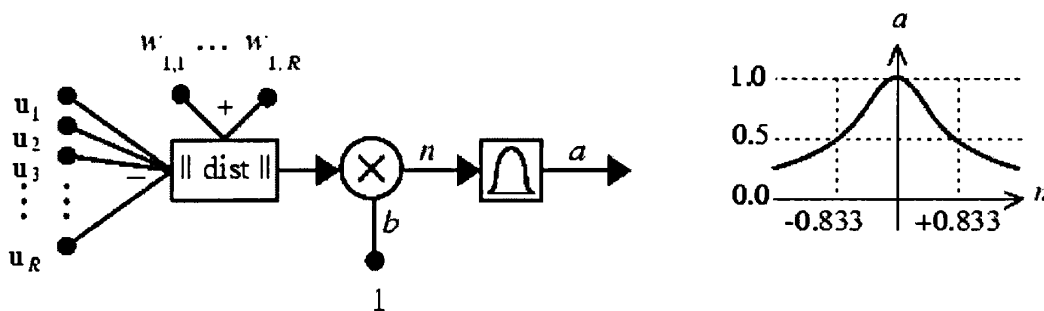


Рисунок 3.18 – Модель нейрона радіальної мережі та графік функції **radbas(n)**.

Сигнал n є добутком величини $w\bar{u}$ на мережне зміщення, де $w = [w_{1,1} \ w_{1,2} \ \dots \ w_{1,k}]$ – матриця-рядок ваг нейрона; \bar{u} – вектор значень вхідної величини u . Отже

$$n = radbas(\|w\bar{u}\| \cdot b),$$

де $\|dist\|$ (рисунок 3) означає добуток матриці-рядка w на вектор \bar{u} .

Функція $radbas(n)$ має одиницю, коли її вхід – нуль, тобто нейрон працює як детектор, що видає одиницю кожного разу, коли вектори $\bar{d} = w^T$ і \bar{u} ортогональні.

Радіальна мережа для апроксимації результатів експерименту показана на рис. 3.19. Вона складається із двох шарів – прихованого і вихідного. Виходом прихованого шару є величина $\bar{a}^{(l)}$, яка генерується функцією $radbas$

$$\bar{a}^{(l)} = radbas(\|IW^{(l,l)} \cdot \bar{u}\| \cdot \bar{b}^{(l)}),$$

де через $\|\cdot\|$ позначено функцію $\|dist\|$. Вектор зміщення $\bar{b}^{(l)}$ і вихід $\|dist\|$ поелементно перемножуються, так що на виході першого шару отримуємо вектор $\bar{a}^{(l)}$.

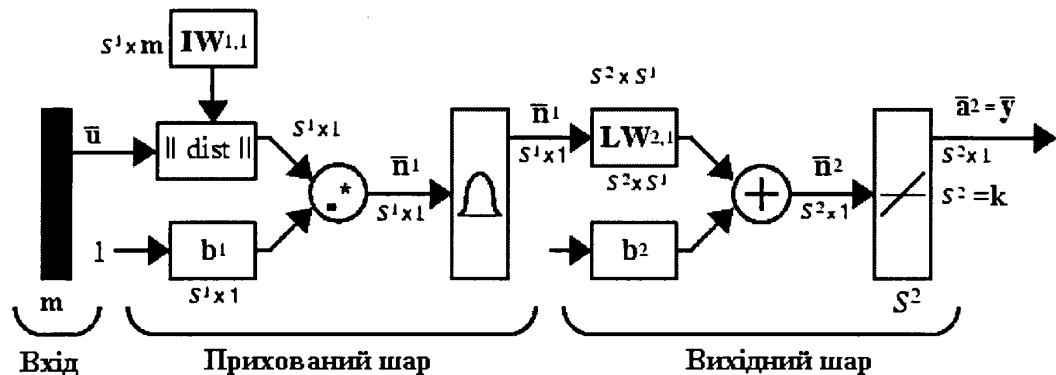


Рисунок 3.19 – Радіальна нейромережа ідентифікації багатовимірному об'єкта

На виході другого шару (вихідного) як функцію активації взято лінійну функцію – $purelin(\bar{n}^{(2)})$, тобто $\bar{y} = purelin(LW^{(2,l)}\bar{a}^{(l)} + b^{(2)})$.

Можливість нейромереж для ідентифікації статички нагнітачів природного газу розглянемо на прикладі компресорного цеху КС – 39 "Прогрес" Богородчанського ЛВУМГ, яка оснащена нагнітачами типу 650-21. Вимірюється витрата газового потоку, який поступає до компресорного цеху. У цеху КС-39

“Прогрес” встановлений електричний привід, де ведеться облік спожитої електроенергії.

Оскільки у кожному із цехів ведеться сумарний облік газу, що перекачується, то при створенні математичних моделей ГПУ робилося допущення, що статичні характеристики однотипних нагнітачів є ідентичні. Тому для групи нагнітачів 650-21 визначались усереднені значення як вхідних, так і вихідних величин.

Табл. 3.4 вміщує назви математичних моделей ГПУ, кількість вхідних величин та їх назви. Для побудови математичних моделей ГПУ використовувались дані журналу диспетчера [57], які є знаннями технологічних параметрів (див. рис. 3.2).

Для побудови математичних моделей ГПУ використовувались нейромережі двох типів – нейромережеві лінійні фільтри і радіальні нейромережі. Результати моделювання статички ГПУ на базі нейромереж порівнювались з МНК-методом (методом найменших квадратів). В останньому випадку була вибрана регресійна модель (3.7).

Всі значення кожної із вхідних величин утворюють вектор \bar{u} із компонентами u_i . Вся послідовність значень u_i була розбита на чотири частини - $u_j, j=2, 6, 10, \dots; u_k, k=4, 8, 12, \dots; u_s, s=1, 5, 9, \dots; u_r, r=3, 7, 11, \dots$. Перша з них навчальна, друга – перевірна, а третя і четверта – тестова. Тепер можна створити нейромережу і провести навчання. Для створення нейромережевих лінійних фільтрів була використана мережа з двома рівнями (див. рис. 3.17), навчання якої здійснювалось за допомогою алгоритму Левенберга-Маркуардта. Нейромережі другого типу (радіальні) будувались як узагальнені регресійні мережі. Вони подібні до радіальних мереж, але на відміну від них, дозволяють регулювати кількість нейронів у вхідному шарі.

Результати ідентифікації статички нагнітачів вміщує табл. 3.5.

Для оцінки точності моделі використовувались величини $\delta_i, \%$ і k_{yy} .

Таблиця 3.3 – Математичні моделі нагнітача 650-21 КС-39 "Прогрес"

Богородчанського ЛВУМГ

№ моделі	Назва математичної моделі	Кількість вхідних величин	Вхідні величини в математичній моделі	Розмір масиву
1	Потужність приводу нагнітача	4	Тиск на вході нагнітача	885
			Ступінь стиску газу	
			Температура навколишнього середовища	
			Частота обертання вала нагнітача	
2	Продуктивність нагнітача	4	Тиск на вході нагнітача	885
			Ступінь стиску газу	
			Температура навколишнього середовища	
			Частота обертання вала нагнітача	
3	Температура на виході нагнітача	5	Тиск на вході нагнітача	885
			Ступінь стиску газу	
			Температура навколишнього середовища	
			Частота обертання вала нагнітача	
			Температура газу на вході в нагнітач	
4	Струм приводу нагнітача	3	Тиск на вході нагнітача	885
			Ступінь стиску газу	
			Частота обертання вала нагнітача	

Таблиця 3.4 – Результати ідентифікації процесу компримування газу

Номер моделі у відповідності з табл. 1	МНК-метод			Нейромережа	
	Порядок полінома Q	Кількість коефіцієнтів моделі	$\delta, \%$	лінійні фільтри	радіальна
			$k_{y\bar{y}}$	$\frac{\delta, \%}{k_{y\bar{y}}}$	$\frac{\delta, \%}{k_{y\bar{y}}}$
1	3	35	1.71	1.55	1.03
			0.97	0.976	0.985
2	4	70	7.07	8.94	2.05
			0.85	0.43	0.899
3	3	56	1.69	1.53	0.58
			0.83	0.874	0.961
4	4	35	2.075	2.44	1.37
			0.67	0.546	0.831

Аналіз табл. 3.5 показує, що в загальному випадку найвищу точність проксимації забезпечують радіальні нейромережі. Дещо поступається їм МНК-метод. Але, враховуючи те, що отримані математичні моделі повинні

використовуватись в задачах оптимізації, МНК-метод може виявитись в таких випадках привабливішим.

Висновки до розділу

1. Проведено аналіз процесу компримування газу як об'єкта керування, що дало можливість виявити його вхідні і вихідні величини.
2. Обґрунтовано емпіричний спосіб побудови математичної моделі, який базується на результатах даних журналу диспетчера, що підвищує достовірність результатів моделювання.
3. Обґрунтовано вибір методу побудови математичної моделі, виходячи із необхідної точності та мінімальної кількості її параметрів, що мінімізує машинні затрати на процес розв'язку задачі оптимального керування.
4. Вперше побудовані емпіричні моделі процесу компримування газу в координатах "вхід – вихід", що є необхідною передумовою розв'язку задачі оптимального керування.
5. Досліджена можливість побудови математичної моделі з використанням нейромереж, яка показала, що такі моделі мають дещо вищу точність в порівнянні з МНК-методом, але вимагають значно більшого часу спостережень за вхідними і вихідними величинами об'єкта.

РОЗДІЛ 4 ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОМПРИМУВАННЯ ГАЗУ

4.1. Формалізація задачі оптимального керування

Метою оптимального керування роботою багатоцехових КС, які мають різні приводи, є мінімізація затрат на компримування газу.

На Богородчанській КС встановлено три нагнітачі типу 650-21-2 з приводом ЕГПА-251; сім нагнітачів RF-2BB –30 (привід ГТК –101) та три нагнітачі PCL-804-2 (привід ГТК-2). Отже, в склад Богородчанської КС входять три групи нагнітачів (цехів), 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.

Станція має надлишкову потужність. Тому працюють не всі агрегати, а тільки їх частина. Отже, виникає задача вибору числа агрегатів в групі (цеху), які повинні працювати паралельно і забезпечувати задану продуктивність станції. Окрім цього, для заданої продуктивності компресорної станції, необхідно добитись оптимального розподілу потоків газу між окремими цехами. А це задача вибору робочих режимів окремих груп (цехів) агрегатів за умови, що будуть забезпечені мінімальні затрати на їх експлуатацію.

Таким чином, задачу оптимального керування будемо розглядати як декомпозицію двох задач [66], що приводить до двоетапного способу розв'язання поставленої задачі.

На першому етапі розв'язується задача вибору необхідної кількості агрегатів в кожному із цехів за умови, що буде забезпечена задана продуктивність всієї компресорної станції і будуть досягнуті мінімальні затрати на її експлуатацію.

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

Задача вибору необхідної кількості агрегатів в кожному із цехів є змістом першого етапу розв'язку загальної задачі оптимального керування.

Формалізуємо поставлену задачу [66]. Для цього введемо такі позначення:

S – кількість груп однотипних компресорів (цехів);

N_j – кількість компресорів в j -тій групі;

C_j – вартість роботи одного компресора j -тої групи на протязі одиниці часу;

b_j – максимальна кількість компресорів в j -тій групі;

q_j – номінальна продуктивність компресора j -тої групи;

q_0 – загальна продуктивність компресорної станції.

Тоді загальні затрати на експлуатацію всієї компресорної станції будуть виражатись таким співвідношенням:

$$R(\bar{N}) = \sum_{j=1}^S C_j N_j, \quad (4.1)$$

де $\bar{N}^T = (N_1, N_2, \dots, N_S)$ – вектор, компоненти якого кількість нагнітачів в кожній із j -от груп ($j = \overline{1, S}$).

Очевидно, що число компресорів N_j в кожній j -тій групі не повинно перевершувати їх максимальне значення b_j , тобто

$$N_j \leq b_j, j = \overline{1, S} \quad (4.2)$$

Загальне число компресорів повинно бути таким, щоб забезпечити необхідну продуктивність всієї компресорної станції. Остання вимога приводить до такого рівняння:

$$\sum_{j=1}^S q_j N_j = q_0. \quad (4.3)$$

До умов (4.2), (4.3) приєднаємо очевидну вимогу невід'ємності значення величини N_j :

$$N_j \geq 0. \quad (4.4)$$

Отже, метою розв'язку поставленої задачі є мінімізація функції (4.1) при виконанні обмежень (4.2) - (4.4).

Змістом другого етапу розв'язку поставленої задачі є підтримання тиску на виході КС на заданому рівні при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами. Тут під оптимальним розподілом слід розуміти таке завантаження цехів, яке забезпечувало би мінімум енерговитрат на компримування газу при виконанні ряду обмежень зі сторони всмоктування і нагнітання.

Для Богородчанської КС, яка має три типи нагнітачів затрати на компримування газу складаються із вартості газу, який йде на спалювання в ГТУ і із вартості електроенергії, що витрачається електроприводом нагнітача. Тобто:

$$R = N_1 C_G q_1^{(2)} + N_2 C_G q_2^{(2)} + N_3 C_E P_E \quad (4.5)$$

де R - вартість роботи компресорної станції, віднесеної до одиниці часу;

C_G - вартість одиниці об'єму газу, що йде на спалювання;

$q_1^{(2)}, q_2^{(2)}$ - витрати газу, які споживають агрегати першої і другої груп компресорів, які віднесені до нормальних умов;

C_E - вартість електроенергії, грн./кВт·год;

P_E - потужність приводу агрегату.

Компресорна станція як об'єкт керування є складним комплексом агрегатів, режим роботи яких необхідно змінювати при коливанні відбору газу вздовж траси магістрального трубопроводу [67, 69]. З цією метою в технологічних схемах КС передбачені такі параметри керування, як число груп агрегатів і кількість агрегатів в групі, в становлення коліс різних діаметрів; зміна частоти обертання ротора нагнітача.

В умовах Богородчанської КС кількість груп агрегатів (цехів) фіксована, а вибір числа агрегатів в кожній із груп є змістом першого етапу розв'язку задачі оптимального керування. Встановлення коліс різних діаметрів не практикується. Тому задачею оптимального керування на другому етапі є вибір частоти обертання ротора нагнітача, виходячи із мінімізації критерію оптимальності (4.5). Такий вибір повинен здійснюватись з врахуванням цілого ряду обмежень на процес компримування газу.

У відповідності з технологічним режимом необхідно обмежити температуру газу на виході із нагнітача – $t_{вих.г}$, температуру продуктів згорання на виході ТНТ t_2 . Для безпомпажної роботи нагнітачів повинна бути обмежена нижня частота обертання для компресорного агрегату. Тобто:

$$t_{вих.г} \leq t_{вих.г}^{(max)}; \quad (4.6)$$

$$t_2 \leq t_2^{(max)}; \quad (4.7)$$

$$n \geq n^{(min)}. \quad (4.8)$$

При виконанні обмежень (4.6) - (4.8) повинна виконуватись вимога забезпечення заданої продуктивності КС - $Q^{(0)}$:

$$Q_1^{(\Sigma)} + Q_2^{(\Sigma)} + Q_3^{(\Sigma)} = Q_0, \quad (4.9)$$

де $t_{вих.г}^{(max)}$, $t_2^{(max)}$ – максимально допустима температура на виході нагнітачів та ТНТ;

$n^{(min)}$ – нижня частота обертання ротора нагнітача, яка забезпечує його безпомпажну роботу;

$Q_1^{(\Sigma)}, Q_2^{(\Sigma)}, Q_3^{(\Sigma)}$ – витрати, які підлягають перекачуванню кожною групою (цехом) нагнітачів.

Очевидно, що

$$Q_i^{(\Sigma)} = \Sigma Q_i^{(\Sigma)} = \sum_j^{N_i} Q_i^{(j)}, \quad i=1,2,3, \quad (4.10)$$

де $Q_i^{(j)}$ – продуктивність j -го нагнітача в i -тій групі;

N_i – кількість нагнітачів i -тій групі.

Тиск на вході нагнітача задається режимом роботи попередньої компресорної станції і він є відомим, а тиск на виході нагнітача повинен мати певне значення, то ступінь стиску компресора ε є визначеною величиною. Це означає, що

$$\varepsilon = \varepsilon_0, \quad (4.11)$$

де ε_0 – значення ступені стиску для заданого режиму роботи компресорної станції.

Таким чином, задачею оптимального керування є мінімізація критерію оптимальності (4.5) за умови, що виконуються обмеження (4.6) - (4.10) та (4.11).

При цьому повинні враховуватись рівняння зв'язку, які впливають із статичних характеристик нагнітача.

4.2. Обмеження в задачі оптимального керування процесом компримування газу

На другому рівні вирішується задача (4.5) - (4.11), яка включає в себе обмеження двох типів.

Обмеження першого типу мають таку структуру:

$$\varphi_i^{(j)}(n_i) \leq a_i^{(j)}, \quad (4.12)$$

$$\psi_i^{(j)}(n_i) \geq b_i^{(j)}, \quad (4.13)$$

де n_i - число оборотів вала нагнітача i -ої групи;

$a_i^{(j)}, b_i^{(j)}$ - постійні величини зміст, яких визначається співвідношеннями (4.6)-(4.7);

j - номер обмеження в i -тій групі.

Обмеження другого типу – це сумарна продуктивність нагнітачів всіх i -тих груп. Це обмеження подано рівнянням (4.9)

Оскільки в кожний момент часу t задані або відомі такі величини, як тиск на вході нагнітача, температура газу при вході в нагнітач, ступінь стиску газу, температура та тиск навколишнього середовища, які є вхідними величинами об'єкта моделювання (ГПУ), то обмеження (4.12) і (4.13) по відношенню до n_i (керувальних дій) є співвідношеннями зі змінними коефіцієнтами. Те саме можна сказати і про критерій оптимальності (4.5). Таким чином, нагнітач, де відбувається процес компримування газу, є об'єктом зі змінними параметрами і його оптимальний режим повинен визначатись періодично.

Період розв'язку задачі $t_{ПЗ}$ визначається двома факторами – інтенсивністю зміни величин $P_{Г.в.}, t_{Г.в.}, \varepsilon, t_C, P_{ам}$ та тривалістю розв'язку задачі оптимізації. Нехай $t_{\delta}^{(min)}$ найменший час дискретизації величин $P_{Г.в.}, t_{Г.в.}, \varepsilon, t_C, P_{ам}$, а t_M – тривалість розв'язку задачі оптимізації. Тоді

$$t_{ПЗ} = \max\{t_{\delta}^{(min)}, t_M\}.$$

Обмеження (4.12) і (4.13) отримані із відповідних математичних моделей (3.2) і (3.3), коли в останні замість змінних $P_{Г.в.}$, $t_{Г.в.}$, ε , t_C , $p_{ам}$ підставлені їх конкретні значення. Оскільки залежності $\varphi_i^{(j)}(n_i)$ і $\psi_i^{(j)}(n_i)$ є функціями тільки однієї змінної n_i і мають форму полінома не вище четвертої степені

$$\{\varphi_i^{(j)}(n_i), \psi_i^{(j)}(n_i)\} = a_0^{(j)} + a_1^{(j)}n_i + a_2^{(j)}n_i^2 + \dots + a_n^{(j)}n_i^n, \quad n \leq 4,$$

то із рівнянь

$$\varphi_i^{(j)}(n_i) = 0, \quad \psi_i^{(j)}(n_i) = 0 \quad (4.14)$$

можна знайти граничне значення частоти обертання $n_{i,сп.}$, яке є верхньою або нижньою межею обмеження (4.12) і (4.13).

Кількість коренів кожного із рівнянь (4.14) не перевищує чотирьох. Серед них можуть бути як від'ємні, так і комплексно-спряжені. Тому серед них слід відібрати тільки додатні, які і будуть $n_{i,сп.}$.

При цьому можливі такі випадки, які показані на рис. 4.1.

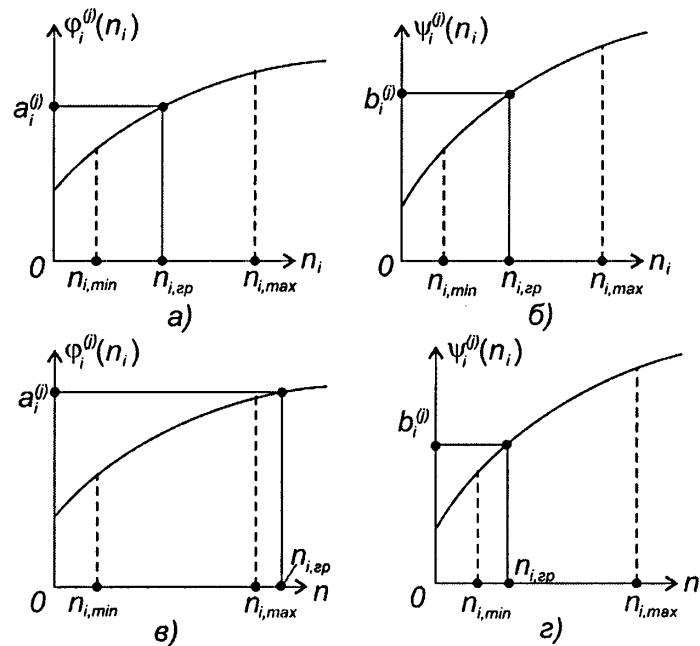


Рисунок 4.1 – До визначення обмежень на керуючу дію – частоту обертання ротора нагнітача

Аналіз рис. 4.1 показує, що обмеження (4.12) визначає верхню границю обмеження

$$\sup n_i = \varphi_i^{-1(j)}(n_i),$$

де $\varphi_i^{-l(j)}(n_i)$ - означає розв'язок рівняння $\varphi_i^{(j)}(n_i) = 0$ відносно додатного кореня, обмеження (4.13) визначає нижню границю обмеження

$$\inf n_i = \psi_i^{-l(j)}(n_i).$$

Для рис. 4.1, маємо

а) $\tilde{n}_{i,max} = \min\{n_{i,zp}, n_{i,max}\} = n_{i,zp};$

б) $\tilde{n}_{i,min} = \max\{n_{i,zp}, n_{i,min}\} = n_{i,zp};$

в) $\tilde{n}_{i,max} = \min\{n_{i,zp}, n_{i,max}\} = n_{i,max};$

г) $\tilde{n}_{i,min} = \max\{n_{i,zp}, n_{i,min}\} = n_{i,min}.$

В тому випадку, коли $j > 1$ відбір мінімального і максимального значень для обмеження на n_i здійснюється за такими правилами (рис. 4.2)

а) $\tilde{n}_{i,max} = \min\{n_{i,zp}^{(1)}, n_{i,zp}^{(2)}, \dots, n_{i,zp}^{(j)}, n_{i,max}\};$

б) $\tilde{n}_{i,min} = \max\{n_{i,zp}^{(1)}, n_{i,zp}^{(2)}, \dots, n_{i,zp}^{(j)}, n_{i,min}\}.$

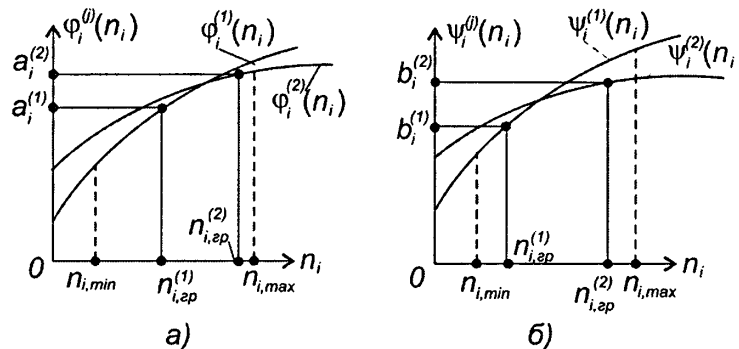


Рисунок 4.2 – Визначення обмежень на керуючу дію, коли $j > 1$

Таким чином, замість обмежень (4.12) і (4.13) отримуємо нові обмеження на керуючу дію

$$\tilde{n}_{i,min} \leq n_i \leq \tilde{n}_{i,max} \quad (4.15)$$

З врахуванням (4.15) задача оптимального керування технологічним режимом багатоцехової КС набуде такого вигляду:

$$R(\bar{n}) = N_1 C_\Gamma q_1^{(\Gamma)}(n_1) + N_2 C_\Gamma q_2^{(\Gamma)}(n_2) + N_3 C_E P_E(n_3) \quad (4.16)$$

$$\tilde{n}_{i,min} \leq n_i \leq \tilde{n}_{i,max}, \quad i=1,2,3, \quad (4.17)$$

$$Q_1^{(\Sigma)}(n_1) + Q_2^{(\Sigma)}(n_2) + Q_3^{(\Sigma)}(n_3) = Q_0. \quad (4.18)$$

4.3. Вибір методів розв'язку задач оптимального керування

Аналіз задачі (4.1) - (4.4) показує, що маємо задачу лінійного програмування, в якій керуючі дії (ресурс оптимізації) $N_j, j=\overline{1, S}$ є цілочисловими змінними.

Методи розв'язку задач цілочисельного лінійного програмування (ЦЛП) можна розділити на дві групи [70, 71]: методи відсічення і комбінаторні методи.

Основою методу відсічення є трансформація задачі ЦЛП в задачу ЛП з ослабленими обмеженнями, які виникають в результаті вилучення вимоги про цілочисловість змінних. В міру ведення спеціальних додаткових обмежень, які враховують умови цілочисельності, область допустимих розв'язків задачі ЛП поступово деформується до досягнення цілочисельного розв'язку початкової задачі. Назву методу дає та обставина, що введені додаткові обмеження відсікають (вилучають) деякі області многокутника допустимих розв'язків, в яких відсутні точки з цілочисельними координатами.

В основі комбінаторних методів лежить ідея перебору можливих варіантів розв'язку задач ЦЛП. В цьому методі на перший план виходить проблема вибору спеціальних тестових процедур, яка дає можливість розглядати лише обмежене число варіантів розв'язку задач, а інші варіанти враховуються опосередковано.

Основний зміст цих методів складає динамічне програмування і сукупність способів розв'язку, які об'єднані загальним терміном – метод “меж і розгалужень”.

Метод відсікаючих площин розроблений Р. Гоморі. Тому алгоритм розв'язку ЦЛП, який ґрунтується на цьому методі, носить ще назву – перший алгоритм Гоморі [70].

Як показала практика розв'язку задач за допомогою алгоритму Гоморі він є малоефективним [71] із-за великого числа необхідних ітерацій.

Подальший розвиток першого алгоритму Гоморі є дробовий алгоритм (циклічний алгоритм цілочисленого програмування). Необхідною умовою застосування даного алгоритму є цілочисельність всіх коефіцієнтів і правих частин обмежень. Вимогою цілочисленості коефіцієнтів і правих частин

Обмежень пов'язана з тією обставиною, що додаткові змінні повинні бути також цілочисельними. В той же час наявність в обмеженнях нецілих чисел приводить до порушення умови цілочисельності додаткових змінних.

Для розв'язку задачі ЦЛП цим методом застосовують симплекс-алгоритм. На відміну від відомого симплекс-алгоритму для задачі ЛП тут використовують ідею відсічення при переході від однієї ітерації до іншої.

Для дробного алгоритму характерні такі недоліки [70]:

- похибки від округлення часом приводять до неоптимального розв'язку задачі;
- проміжні розв'язки ЦЛП не є оптимальними. Це означає, що у випадку вимушеного переривання розв'язку пам'ять ЕОМ не буде вмещувати ніякого допустимого цілочисленого розв'язку початкової задачі.

Динамічне програмування [71] – це універсальний метод розв'язку задач на умовний екстремум, для яких має місце принцип оптимальності. Принцип оптимальності Белмана завжди має місце для задач з сепарабельними і лінійними функціями мети (критеріями оптимальності). Обмеження у вигляді нерівностей і рівностей, а також вимога цілочисленості, враховуються в процесі розв'язку функціонального рівняння Белмана.

Основна перешкода у використанні методу динамічного програмування полягає в необхідності трансформації початкової задачі до моделі багатокрокового процесу оптимізації, який використовується в цьому методі, після введення рівняння Белмана.

Метод меж і розгалужень, подібно до методу відсікаючих площин, також опирається на розв'язок задач з ослабленими обмеженнями. У відповідності з загальною ідеєю методу, спочатку розв'язується задача ЛП, де допускається, що змінні можуть приймати і не цілочисельні значення (ослаблення обмежень). Позначимо через u_r – цілочисельну змінну, яка в оптимальному розв'язку ослабленої задачі приймає неціле значення - u_r' . Інтервал:

$$\left[u_r' \right] < u_r < \left[u_r' \right] + 1,$$

де $[u_r']$ – ціла частина числа u_r' , не вміщує цілих компонент розв'язку задачі. Тому можливе ціле значення u_r повинно задовольняти одному із двох нерівностей

$$u_r \leq [u_r'], \quad u_r \geq [u_r'] + 1.$$

Введення цих додаткових умов в задачу з ослабленнями породжує дві не зв'язані між собою задачі. Це означає, що початкова задача розгалужується, породжуючи дві підзадачі. Потім кожна із задач розв'язується як задача ЛП (з функцією мети початкової задачі). Якщо отриманий оптимум є можливим для цілочислової задачі, такий розв'язок слід зафіксувати як найкращий. В протилежному випадку під задача повинна бути розбита на дві під задачі з врахуванням умови цілого значення змінних, значення яких в оптимальному розв'язку не є цілим. Зрозуміло, як тільки одне із оптимальних цілих розв'язків підзадачі є кращим за те, що вже отримане, воно запам'ятовується замість того, яке було зафіксоване раніше. Процес розгалуження продовжується до досягнення оптимального цілісного розв'язку, або до встановлення відсутності такого.

Ефективність обчислювальної схеми можна підвищити, якщо ввести поняття границі [70], на основі якого робиться висновок про необхідність подальшого розбиття кожної із підзадач. Якщо оптимальний розв'язок чергової підзадачі з ослабленими обмеженнями дає гірше значення цільової функції, ніж уже отриманий розв'язок, цю підзадачу розглядати в подальшому немає сенсу. Це означає, що підзадача прозондована і її можна вилучити із підзадач, які генеруються початковою задачею.

Іншими словами, отриманий цілочисельний розв'язок чергової під задачі може служити для визначення верхньої чи нижньої межі цільової функції, наявність якої дає можливість формалізувати процедуру вилучення прозондованих підзадач.

Недоліком методу є відсутність інформації про кількість підзадач, які необхідно розв'язати і виникненням проблеми верифікації цілочислового оптимуму. Це приводить не тільки до збільшення часу обчислень, але, в разі випадків, до переповнення пам'яті ЕОМ.

Не дивлячись на ці недоліки, метод меж і розгалужень є найефективнішим способом розв'язку задач ЦЛП [70]. Всі відомі машинні програми засновані на цьому методі. Але це не означає, що виключно всі задачі ЦЛП можуть бути розв'язані з використанням цього методу. Але поза цим проблема вибору між методом відсічень і методом меж і розгалужень вирішується на користь останнього.

По відношенню до керуючих дій n , задача оптимального керування (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.

Основними методами, які застосовують для розв'язку НП-задач є методи штрафних і бар'єрних функцій, методи приведених градієнтів і проекцій градієнтів, методи модифікованих функцій Лагранжа та методи спроектованого лагранжіана.

Метод штрафних і бар'єрних функцій [73] ґрунтується на тому, що конструюється нова функція, яка включає в себе обмеження НП-задачі і розв'язок якої співпадає з розв'язком початкової задачі. При цьому розв'язок НП-задачі зводиться до розв'язку послідовності задач безумовної мінімізації, кожна з яких залежить від деякого параметра ρ .

Недоліком метода штрафних і бар'єрних функцій є, як правило, погана обумовленість матриці Геса (особливо при великому ρ), а також отримання наближеного розв'язку НП-задачі.

Методи приведених градієнтів і проекцій градієнтів [74] реалізують таку ідею: рухатись до розв'язку по точках, що є дозволеними, монотонно зменшуючи критерій оптимальності, зі збереженням обмежень-рівностей в деяких обмеженнях.

Коли обмеження лінійні, така процедура досягається за рахунок особливого конструювання напрямку пошуку. На нелінійні обмеження такий підхід

безпосередньо не узагальнюється. Для нелінійних обмежень необхідно застосовувати ітеративні процедури корекції [74].

Методи приведених градієнтів і проєкцій градієнтів непогано працюють в тих випадках коли обмеження майже лінійні. Якщо нелінійність обмеження значна і початкова точка знаходиться далеко від оптимальної, вимога забезпечення обмежень рівностей з великою точністю може привести до того, що рух до точки оптимального розв'язку буде здійснюватись малими кроками.

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 Φ_U підбирають так, щоб не було невідвортної поганої обумовленості як в методах штрафних і бар'єрних функцій, так і розривності похідних як в методі негладких функцій [61].

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 Φ_U .

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. При розв'язку НП-задач цими методами наряду із оптимальним значенням \bar{u}^* визначають і множники Лагранжа λ .

Проаналізуємо цей метод більш детально, оскільки він лежить в основі програми `fmincon`, яка входить в інструментарій Optimization Toolbox системи Matlab.

Отже, розв'язується така задача: знайти мінімум скалярної функції багатьох

мінних

$$\begin{aligned} \bar{u}^T &= (u_1, u_2, \dots, u_n) \\ \min : R(\bar{u}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

при обмеженнях

$$\bar{C}(\bar{u}) \leq \bar{\theta}, \quad (4.20)$$

$$\bar{C}_{eq}(\bar{u}) = \bar{\theta}, \quad (4.21)$$

$$A \cdot \bar{u} \leq \bar{b}, \quad (4.22)$$

$$A_{eq} \bar{u} = \bar{b}_{eq}, \quad (4.23)$$

$$\bar{l}b \leq \bar{u} \leq \bar{u}b, \quad (4.24)$$

де $\bar{u}, \bar{b}, \bar{b}_{eq}, \bar{l}b$ і $\bar{u}b$ - вектори, A і A_{eq} - матриці $\bar{C}(\bar{u})$ і $C_{eq}(\bar{u})$ - вектори-функції.

Щоб спростити опис алгоритму розв'язку допустимо, що список активних обмежень-нерівностей відомий. Методи їх знаходження описані в [61].

Допустимо, що $C(\bar{u})$ - вектор-функція активних обмежень. Тоді загальний

вигляд підзадачі на k -тій ітерації має такий вигляд [61]:

$$\Phi_{LC}(P) = \frac{1}{2} \bar{d}^T H_k \bar{d} + \nabla^T R(\bar{u}_k) \bar{d}. \quad (4.25)$$

Знайти \min при обмеженнях

$$J(\bar{u}_k) \bar{d} = -C(\bar{u}_k), \quad (4.26)$$

де H_k - матриця Гесе функції Лагранжа - $L(\bar{u}, \bar{\lambda}) = R(\bar{u}) + \bar{\lambda}^T C(\bar{u})$,

$J(\bar{u}_k)$ - матриця Якобі, що обчислена в точці $\bar{u} = \bar{u}_k$.

$\nabla R(\bar{u}_k)$ градієнт функції $R(\bar{u})$, який обчислений в точці $\bar{u} = \bar{u}_k$.

Підзадачу (4.22), (4.23) можна розв'язати як задачу квадратичного програмування. Її розв'язок 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 α_k визначається із умови мінімізації функції якості (4.19) за параметром α_k при збереженні обмежень (4.20) - (4.24).

4.4. Алгоритмічне та програмне забезпечення задач оптимального керування

В розд. 4.1 була сформована задача оптимального керування, у відповідності з якою необхідно вибрати такий режим роботи багатоцехової КС, щоб загальні затрати на компримування газу були б мінімальними.

Ця задача має дворівневу структуру [66, 75]. На першому рівні, виходячи із мінімальних затрат на компримування газу, визначають кількість працюючих компресорів в групі (цеху). На другому рівні визначають технологічні режими для кожної компресорної групи.

В табл. 4.1 наведені вихідні дані, а в табл. 4.2 результати розрахунку, які є розв'язком задачі першого рівня, який знайдено на основі методу меж і розгалужень.

Програма `fmincom` знаходить розв'язок задачі оптимізації (4.19)-(4.24), починаючи з початкової точки $\bar{u}^{(0)}$. Вона оформлена у вигляді m -функції і має такий вигляд:

$$[x, fval, exitflag, output, lumbda]= \\ =fmincom (fun, x0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, nonlcon, options, P1, P2, \dots), \quad (4.27)$$

де fun – m -файл, який вміщує функцію, що підлягає мінімізації;

$nonlcon$ – m -файл, який вміщує нелінійні обмеження-рівності та обмеження-нерівності.

Таблиця 4.1 - Вихідні дані для розв'язку оптимізаційної задачі знаходження необхідної кількості працюючих агрегатів на трьох компресорних станціях Богородчанської КС

Характеристики	Компресорні станції		
	КС 39 "ПРОГРЕС"	КС 21 "СОЮЗ"	КС 39 "У-П-У"
Типи нагнітачів	650-21	RF-2BB-30	PCL-804
Загальна кількість нагнітачів	3	7	3
Характеристики	Компресорні станції		
	КС 39 "ПРОГРЕС"	КС 21 "СОЮЗ"	КС 39 "У-П-У"

Характеристики	Компресорні станції		
	КС 39 "ПРОГРЕС"	КС 21 "СОЮЗ"	КС 39 "У-П-У"
З них : в резерві	1	1	1
в ремонті	0	1	1
Ресурс оптимізації	2	5	1
Продуктивність, м ³ /год	1783300,00	733300,00	1779000,00
Енергетичні затрати на привід: електропривідні, кВт/год	25000		
газотурбінні, тис. м ³ /год		3,3	7,9
Вартість енергоресурсів: електроенергії, грн. за 1 кВт/год	0,2		
паливного газу, грн. за 1000 м ³		276,25	276,25

Таблиця 4.2 - Результати розв'язку оптимізаційної задачі знаходження необхідної кількості нагнітачів за критерієм мінімуму вартості енергетичних затрат на перекачку газу

Характеристики	Компресорні станції		
	КС 39 "ПРОГРЕС"	КС 21 "СОЮЗ"	КС 39 "У-П-У"
Типи нагнітачів	650-21	RF-2BB-30	PCL-804
Заданий об'єм перекачки через Богородчанську КС, м ³ /год	6500000		
Ресурс оптимізації	2	5	1
Оптимальна кількість агрегатів	2,00	2,00	1,00
Об'єм перекачки при оптимальному виборі кількості агрегатів, м ³ /год:			
загальний по компресорним станціям	6812200,00		
Оптимальні затрати на перекачку, грн. за 1000 н. м ³ :	3566600,00	1466600,00	1779000,00
загальні по компресорним станціям	2.80	2.06 1,24	1,23

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:

$$exitflag = \begin{cases} 1 & \text{- оптимізація успішно завершена;} \\ 0 & \text{- перевершено максимальне число ітерацій;} \\ -1 & \text{- мінімізація незавершена.} \end{cases}$$

¹ *output* – структура, яка містить інформацію про процес оптимізації.

Змінні структури:

Lower – нижні межі *lb*;

Upper – верхні межі *ub*;

Ineqlin – лінійні нерівності;

Eqlin – лінійні рівняння;

ineqnonlin – нелінійні нерівності;

eqnonlin – нелінійні рівняння;

iterations – кількість використаних ітерацій;

funcCount – кількість функціональних перетворень;

algorithm – використаний алгоритм;

lambda – структура, яка вміщує множники Лагранжа;

P1, *P2*, ... – додаткові аргументи, які повинні бути об'явлені як глобальні.

Програма оптимізації написана в середовищі Matlab і складається з файла-сценарія (Script-файла) і *m*-файлів (додаток 3).

Є чотири типи *m*-файлів:

m-файли, які визначають обмеження за вихідною температурою газу на виході нагнітачів;

m-файли, які визначають обмеження за температурою вихлопних газів;

m-файли, які визначають обмеження за струмом нагнітача;

m-файл (4.27), який розв'язує задачу оптимізації (4.19)-(4.24).

M-файл (4.27) має таку структуру (див. додаток 3):

$$\begin{aligned} [x, Gval, exitflag] = \\ = fmincom (@fun_G, x0, [], [], [], [], lb, ub, @fun_ceq, options, zet, zet1), \end{aligned} \quad (4.28)$$

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:

$$Q_1^{(\varepsilon)}(n_1) + Q_2^{(\varepsilon)}(n_2) + Q_3^{(\varepsilon)}(n_3) - Q_0 = 0$$

Оскільки НП-задача (4.16)-(4.18) не вміщує обмежень типу (4.22), (4.23), то в *m*-файлі (4.28) на це вказує символ “пусто” – [], тобто в *m*-файлі (4.28) відсутні матриці *A* і *A_{eq}* та вектори *b* і *b_{eq}*.

4.4.1 Розв'язок задачі оптимального керування двома групами працюючих агрегатів

Розглянемо задачу оптимізації процесу компримування газу, коли працюють два агрегати на КС-21 “Союз” і один агрегат на КС-39 “УПУ”. При цьому компримування газу відбувається за таких умов:

температура газу на вході в нагнітачі $t_{г.в.} = 20^{\circ}\text{C}$;

атмосферний тиск – 738 мм. рт. ст

ступінь стискування газу - $\varepsilon = 1,35$;

тиск газу на вході в нагнітачі – $P_{г.в.} = 49 \text{ кгс/см}^2$ (4,9 Мпа);

температура навколишнього повітря – $t_c = -6^{\circ}\text{C}$.

Загальна продуктивність компресорних станцій КС-21 “Союз” і КС-39 “УПУ” складає – $Q_0 = 54160 \text{ Нм}^3/\text{хв}$.

Обмеження на змінні задачі:

температура газу на виході КС-21 “Союз” не повинна перевищувати -54°C , а на виході КС-39 “УПУ” -51°C ;

температура вихлопних газів на виході із ГПА КС-21 “Союз” повинна не перевищувати -495°C , а на КС-39 “УПУ” – 460°C .

Оскільки ГПА, які встановлені на КС-21 “Союз” і КС-39 “УПУ” оснащені газотурбінними приводами, а вартість одиниці об'єму газу e_g , що йде на спалювання однакова для всіх газотурбінних приводів, то критерій оптимальності (4.16) вибраний в такому вигляді:

$$R(\bar{n}) = N_1 q_1^{(\Gamma)}(n_1) + N_2 q_2^{(\Gamma)}(n_2) \quad (4.29)$$

тобто критерій оптимальності $R(\bar{n})$ - це загальні затрати газу на спалювання.

А обмеження задачі будуть такими:

$$\tilde{n}_{i,min} \leq n_i \leq \tilde{n}_{i,max}, \quad (4.30)$$

$$Q_1^{(\Sigma)}(n_1) + Q_2^{(\Sigma)}(n_2) = Q_0. \quad (4.31)$$

Результат розв'язку задачі (4.29)-(4.31)

$$n_1^* = 82.3\%,$$

$$n_2^* = 96.95\%,$$

$$R(\bar{n}^*) = 225 \text{ Нм}^3/\text{хв}$$

Обороти нагнітачів задані у відсотках від їх номінальних значень, тобто:

$$n_1^* = 0,823 n_{1H},$$

$$n_2^* = 0,9695 n_{2H}.$$

Відмітимо, що індекс “1” ідентифікує параметри КС-39 “УПУ”, а індекс “2” - параметри КС-21 “Союз”.

M-сценарій програми оптимізації процесу компримування газу має назву – Optum_G.m. Перелік всіх *M*-файлів, які використані в Optum_G.m. вміщує табл. 4.3.

Для розв'язку задачі (4.29)-(4.30) необхідно виконати таку послідовність кроків:

Sp.1. В script-файлі задати: обмеження на температуру газу на виході із нагнітачів; $t1_min$; $t2_max$; обмеження на температуру вихлопних газів $tv1_min$; $tv2_max$; умови, що визначають роботу нагнітача:

температура газу на вході в нагнітач tv_g ;

ступінь стискування газу E ;

тиск газу на вході нагнітача P_{vg} ;

температура та тиск навколишнього середовища t_c і p_{am} .

Також необхідно задати початкові умови у такому вигляді:

$$x0 = [n_{10} \ n_{20}],$$

де n_{10} і n_{20} – початкові значення числа оборотів першого і другого нагнітачів.

Таблиця 4.3 – Перелік m -файлів програми Optum_G.m.

Назва m -файлу	Коротка характеристика m -файла
<i>fun_org.m</i>	Формує обмеження задачі за температурою газу на виході із нагнітачів
<i>fun_org1.m</i>	Формує обмеження задачі за температурою вихідних газів
<i>fun_G.m.</i>	Формує цільову функцію $R(\bar{u})$
<i>fun_eq.m.</i>	Формує обмеження (4.31)
<i>fun_R1.m</i> <i>fun_R2.m</i>	Обчислює поліноми від змінних n_1 і n_2
<i>fun_a1.m</i> <i>fun_a2.m</i>	Обчислює коефіцієнти поліномів від змінних n_1 і n_2 (для КС-39 "УПУ")
<i>fun_r.m.</i>	Розв'язує рівняння $\varphi_i(n_i)=0$ або $\psi_i(n_i)=0$ і знаходить $n_{i,sp}$
<i>fun_aa1.m</i> <i>fun_aa2.m</i>	Обчислює коефіцієнти поліномів від змінних n_1 і n_2 (для КС-21 "Союз")

Sp.2. В *script* – файлі потрібно задати кількість працюючих агрегатів $N1$, $N2$ та сумарну продуктивність агрегатів Q_{max} .

Дані, які задаються в *Sp. 1*, формують вектор $zet = [tvg \ E \ Pvg \ tc]$, а дані із *Sp. 2* – вектор $zet1 = [Q_{max} \ N1 \ N2]$.

В усіх файлах, що в своїй назві мають цифру "1" дані відносяться до КС-39 "УПУ", а з цифрою "2" – до КС-21 "Союз".

4.4.2 Розв'язок задачі оптимального керування трьома групами працюючих агрегатів

В тому випадку, коли працюють три групи агрегатів (цехів) КС – КС-39 "УПУ", КС-21 "Союз", КС-39 "Прогрес" для заданого об'єму перекачки газу була обчислена кількість агрегатів для кожного цеху (див. табл. 4.1). При цьому компримування газу відбувалося за таких умов:

температура газу на вході в нагнітачі $t_{г.в.}=20^{\circ}\text{C}$;

ступінь стискування газу - $\varepsilon=1,35$;

тиск газу на вході в нагнітачі – $P_{г.в.}=49\text{кгс/см}^2$ (4,9 Мпа);

температура навколишнього повітря – $t_c=-6^{\circ}\text{C}$;

атмосферний тиск – 738 мм. рт. ст..

Загальна продуктивність компресорних цехів КС-39 “УПУ”, КС-21 “Союз” і КС-39 “Прогрес” складає – $Q_0=104160 \text{ н.м}^3/\text{хв}$. Слід відмітити, що Q_0 дещо менше за значення сумарної продуктивності КС, яка отримана на першому етапі оптимізації і складає 133500. Зменшення становить 23 % від номінального. Для процесу оптимізації це явище сприятливе оскільки є певний запас продуктивності, що дає можливість гнучкіше розподіляти ресурси оптимізації між агрегатами.

Обмеження на змінні задачі:

температура газу на виході КС-21 “Союз” не повинна перевищувати -54°C , на виході КС-39 “УПУ” -51°C , а на виході КС-39 “Прогрес” – 48°C .

температура вихлопних газів на виході із ГПА КС-21 “Союз” повинна не перевищувати -495°C , а на КС-39 “УПУ” – 460°C . Для КС-39 “Прогрес” задається обмеження за струмом приводу нагнітача. Його значення не повинно перевершувати 1290 А.

Оскільки ГПА, які встановлені на КС-39 “УПУ” і КС-21 “Союз” оснащені газотурбінними приводами, а на КС-39 “Прогрес” встановлений електропривод, то для перших двох агрегатів необхідно задати вартість об’єму газу C_T , а для КС-39 “Прогрес” потрібно мати вартість одної кіловат-години C_E . В нашому випадку $C_T=276.25$ грн. за 1000 нормальних кубічних метрів, $C_E=0.2$ грн. за одну кіловат-годину.

Для розв’язку задачі (4.16)-(4.18) необхідно виконати таку послідовність кроків:

Sp.1. В script-файлі задати: обмеження на температуру газу на виході із нагнітачів $t1_min$; $t2_max$; $t3_max$; обмеження на температуру вихлопних газів $tv1_min$; $tv2_max$; обмеження на струм приводу нагнітача для КС-39 “Прогрес” I_max ; умови, що визначають роботу нагнітача:

температура газу на вході в нагнітач tv_g ;

ступінь стискування газу E ;

тиск газу на вході нагнітача Pvg ;

температура та тиск навколишнього середовища t_c, p_{am} .

Також задаються початкові умови у такому вигляді:

$$x_0 = [n_{10} \ n_{20} \ n_{30}],$$

де n_{10} , n_{20} і n_{30} – початкові значення числа оборотів нагнітачів, які встановлені відповідно на КС-39 "УПУ", КС-21 "Союз" і КС-39 "Прогрес".

Ср.2. В script - файлі задайте кількість працюючих агрегатів $N1$, $N2$, $N3$ (у випадку, що розглядається $N1=1$, $N2=2$, $N3=2$) та сумарну продуктивність агрегатів Q_{max} .

Дані, які задаються в Ср. 1, формують вектор $zet = [tvg \ E \ Pvg \ tc]$, а дані із Ср. 2 – вектор $zet1 = [Q_{max} \ N1 \ N2 \ N3 \ C_r \ C_E]$.

В усіх файлах, що в своїй назві мають цифру "1" дані відносяться до КС-39 "УПУ", з цифрою "2" – до КС-21 "Союз", а з цифрою "3" – до КС-39 "Прогрес".

Результат розв'язку задачі (4.16)-(4.18):

частота обертання вала нагнітача КС-39 "УПУ" – $n_1^* = 90,92 \%$,

частота обертання вала нагнітача КС-21 "Союз" – $n_2^* = 97,3 \%$,

частота обертання вала нагнітача КС-39 "Прогрес" – $n_3^* = 92,45 \%$

загальна вартість роботи чотирьох агрегатів на КС-39 "УПУ", КС-21 "Союз", КС-39 "Прогрес" складає – $R(\bar{n}^*) = 10193$ грн/год.

Script-файл програми оптимізації процесу компримування газу має назву – Optum_G.m. Перелік всіх M-файлів, які використані в Optum_G.m. вміщує табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Перелік m-файлів програми Optum_G.m.

Назва m-файлу	Коротка характеристика m-файла
fun_org.m	Формує обмеження задачі за температурою газу на виході із нагнітачів
fun_org1.m	Формує обмеження задачі за температурою вихідних газів та за струмом приводу нагнітача
fun_G.m.	Формує цільову функцію $R(\bar{u})$
fun_eq.m.	Формує обмеження (4.31)

Назва <i>m</i> -файлу	Коротка характеристика <i>m</i> -файла
<i>fun_R1.m</i> <i>fun_R2.m</i> <i>fun_R3.m</i>	Обчислює поліноми від змінних n_1, n_2 і n_3
<i>fun_a1.m</i> <i>fun_a2.m</i> <i>fun_a3.m</i>	Обчислює коефіцієнти поліномів від змінних n_1, n_2 і n_3 для обмежень, що визначають $n_{i,min}$
<i>fun_r.m.</i>	Розв'язує рівняння $\varphi_i(n_i)=0$ або $\psi_i(n_i)=0$ і знаходить $n_{i,sp}$
<i>fun_aa1.m</i> <i>fun_aa2.m</i> <i>fun_aa3.m</i>	Обчислює коефіцієнти поліномів від змінних n_1, n_2 і n_3 для обмежень, що визначають $n_{i,max}$

Текст програми оптимізації Optum_G поданий в додатку К. Відмітимо, що тут наведені script-файл та *m*-файли, яких не вміщує додаток З.

Висновки до розділу

1. Вперше задача оптимального керування процесом компримування газу подана як дворівнева, що дало можливість спростити розв'язок такої задачі.
2. На першому рівні сформована і розв'язана задача вибору оптимальної кількості компресорів, як задача цілочисленного лінійного програмування, що дозволило мінімізувати загальні затрати на компримування газу при номінальному режимі роботи нагнітачів.
3. На другому рівні формалізована задача розрахунку оптимального режиму компримування газу, виходячи із знайденої кількості компресорів на першому етапі і мінімальних затрат на компримування газу, що дає економію до 2 % від загальних затрат на компримування газу.
4. Зроблений аналіз методів розв'язку задач оптимізації і на цій основі розроблені ефективні алгоритми розв'язку таких задач, що дало можливість застосувати інструментарій Optimization Toolbox системи Matlab.
5. Вперше запропоновано спосіб введення обмежень на основні технологічні параметри, що дозволило звести такі обмеження до обмежень на керуючу дію (частоту обертання вала нагнітача).

6. Ефективність і збіжність алгоритмів розв'язку задач оптимального керування перевірено на конкретних прикладах, які базуються на даних експлуатації компресорних станцій Богородчанського ЛВУМГ, що підтвердило їх можливість застосування в системі оптимального керування процесом стискування газу.

РОЗДІЛ 5

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОЦЕХОВИМИ КОМПРЕСОРНИМИ СТАНЦІЯМИ

5.1 Структура системи оптимального керування багатоцеховими КС

Оскільки Богородчанська КС є кущовою і включає в себе три компресорні станції, запропонована ієрархічна розподілена система керування (рис.5.1), яка інтегрує в собі три АСК КС і забезпечує оперативно-диспетчерське керування ними в реальному часі. Система розгорнута в об'ємі необхідному для розуміння реалізації концепції оптимального керування групою КС, які працюють паралельно.

Система керування Богородчанського ЛВУМГ має чотирирівневу ієрархічну структуру. Перший та другий рівень охоплює компресорні станції (КС-21, КС-39-“УПУ”, КС-39-“Прогрес”). Третій рівень керування відноситься до рівня диспетчера ЛВУМГ, а четвертий - охоплює рівень диспетчера УМГ.

Найнижчий рівень системи керування представляє собою мережу контролерів [76], 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 ЛВУМГ.

Другий рівень керування охоплює рівень АСК КС, який включає в себе низку функціонально - орієнтованих АРМ (на рис.5.1 показано тільки АРМ змінного інженера- технолога 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 КС та формування звітних документів.

Третій рівень системи керування – це рівень оперативного планування диспетчера ЛВУМГ (АСК ЛВУМГ). 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. На цьому рівні розв'язуються задачі розрахунку техніко-економічних показників роботи КС та оптимізації їхньої роботи на рівні ЛВУМГ. Диспетчер ЛВУМГ на основі проведених розрахунків та з врахуванням завдання від диспетчера УМГ, формує завдання на перекачку газу КС ЛВУМГ. Крім того, на цьому рівні, розгорнуті АРМ допоміжних об'єктів.

Частина інформації з рівня ЛВУМГ передається диспетчеру УМГ для оперативно- тактичного планування роботи транспортної системи УМГ.

5.2 Апаратне забезпечення АСК

За основу САК ГПА [76] прийняті системи керування серії САТ фірми НВП “Нова техніка”, які реалізовані на програмно-технічних засобах компанії “GE FANUC Avtomation” і є позитивний досвід їх роботи на КС “Бердичів”, “Кіровоградська”, “Волинська” та “Ужгород”.

Апаратна частина нижнього рівня керування складається з програмованих логічних контролерів (ПЛК) 90-70 і ПЛК 90-30 фірми “GE FANUC”, блоків вводу-виводу сигналів FIELD CONTROL, які зв'язані між собою по мережі “Genius” у межах кожної компресорної станції. Шина “Genius” (локальна мережа) забезпечує обмін інформацією по послідовному каналу між ПЛК, блоками FIELD CONTROL, дисплейною станцією змінного інженера-технолога та іншими АРМ і блоками, які мають відповідні канали або контролери зв'язку.

ПЛК 90-70 та 90-30, що входить до складу системи, призначений для збору та попередньої обробки інформації, яка надходить від первинних давачів об'єкта керування (САК ГПА), та видачі керуючих

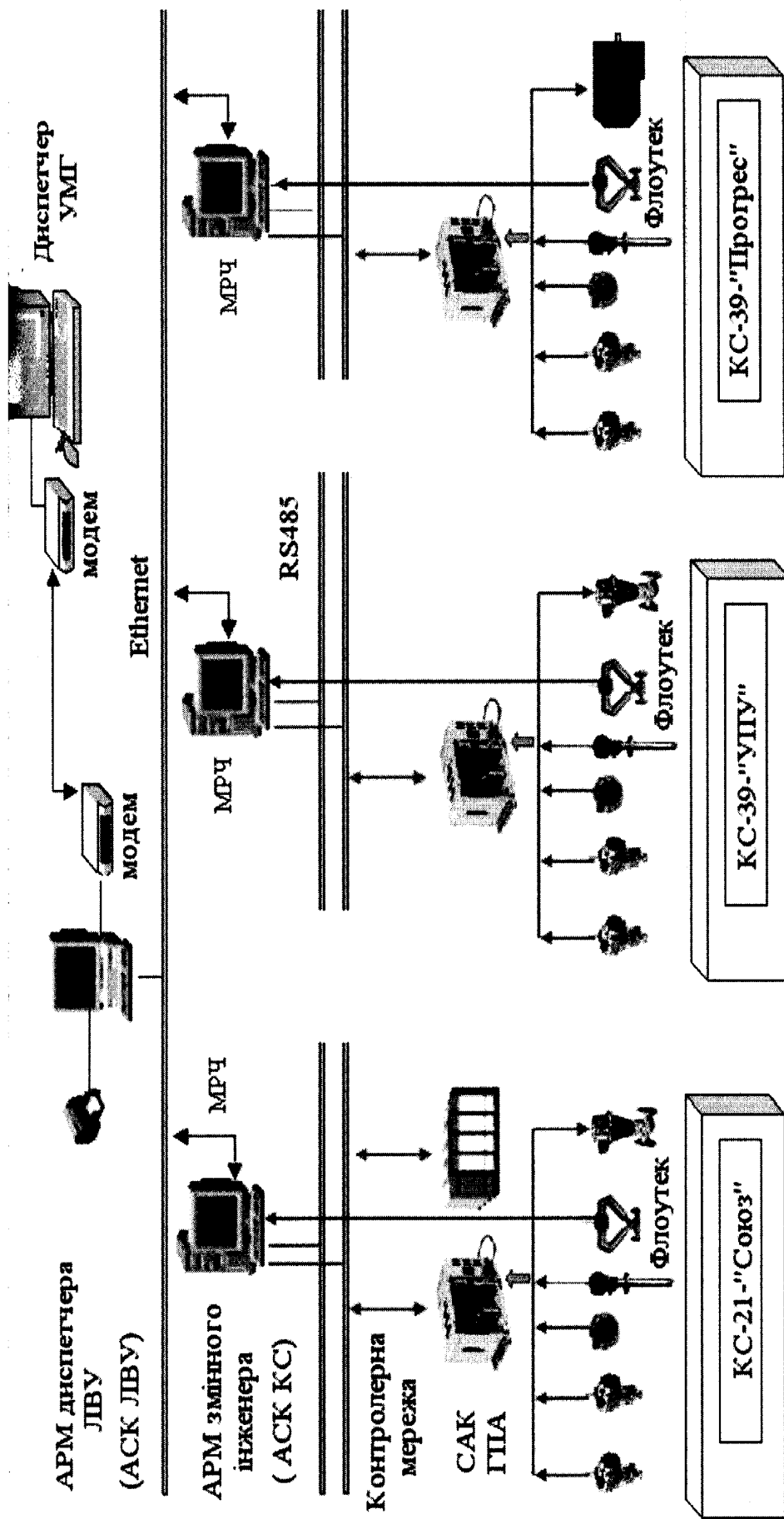


Рисунок 5.1- Структура мікропроцесорної системи оптимального керування

сигналів на виконавчі механізми ГПА. Обробка та видача сигналів відбувається згідно пакету прикладних програм, що реалізують вимоги по контролю та управлінню САК ГПА Конструкція ПЛК (рис.5.2) включає в себе корзину, в якій встановлені модулі. Модулі розташовані згідно конфігурації ПЛК, яка задається програмою Logicmaster 90.. Програмується ПЛК 90-70 на мові релейної логіки у середовищі Logicmaster 90.

Рисунок 5.2-Варіант компоновки контролера ПЛК 90-70

AD1 PS	AD2 CPU	AD3 GBS	AD4 GBC	AD5 HSC	AD6 АЦП	AD7 АЦП (розш)	AD8 ЦАП	AD9 DO	AD10 DO
				4 к	8 к	16 к	4 к	32 к	32 к

ПЛК 90-70 вміщує модуль живлення PS, модуль процесора CPU, два контролера (ЛМ) GENIUS, модуль АЦП, модуль розширення АЦП, модуль ЦАП та два модулі дискретного виводу (DO).

На входи АЦП та розширювача АЦП поступають аналогові сигнали (4-20мА) від давачів, які контролюють всі необхідні режимні параметри ГПА . Модуль ЦАП формує уніфіковані сигнали 4-20мА на керування регулюючими клапанами “Woodward” та “Macveld”. Модулі дискретного виводу здійснюють видачу дискретних сигналів на блок вихідних реле для керування виконавчими механізмами ГПА.

Програмовані логічні контролери GE FANUC виконують в системі керування такі функції :

- збір дискретних сигналів по локальній мережі (ЛМ) GENIUS;
- вимірювання частотних сигналів (модуль HSC);
- збір аналогових сигналів через модулі вводу АЦП та модулі зв’язку з внутрішньою локальною мережею (ЛМ) GENIUS (рис.5.3);
- обробка зібраних сигналів в процесорі (CPU);

- реалізація основних режимів керування ГПА за допомогою програми записаної в модуль процесора (CPU);
- видача сигналів керування через модулі дискретного (DO) та аналогового виводів (ЦАП);
- обмін даними між ПЛК та блоком FIELD CONTROL по внутрішній (ЛМ) GENIUS;
- обмін інформацією з пристроєм ПО-03 по зовнішній (ЛМ) GENIUS;

Обмін даними між всіма елементами системи здійснюється через інтерфейсні канали "Genius", які характеризуються наступними параметрами :

- кількість блоків для обміну – до 31;
- тип зв'язку – послідовний (daisy-chain);
- швидкість обміну – до 153,6;
- максимальна довжина мережі – до 600 м;
- тип кабеля – BELDEN 9182 (екранована вита пара).
- кодування даних – кожен біт кодується 3 дипульсами;
- приймач – голосуванням 2 з 3-х коректує збої на шині.

Дані можуть передаватись у двох режимах:

- режим "Широкомовлення"(broadcasting – глобальні дані), коли один з контролерів передає інформацію, а всі інші можуть одночасно приймати інформацію. У цьому режимі один контролер може передавати до 128 байт інформації в одній посилці.

- режим "Дейтаграм" (datagrams) – коли один з контролерів посилає дані іншому контролеру. Кожен контролер передає до 128 байт.

Конфігурація шини "Genius" для комплексу технічних засобів САТ-03 приведена на рис. 5.3. Використовуються дві локальні шини "Genius" :

- "Genius -1" – керуюча;
- "Genius -2" – інформаційна.

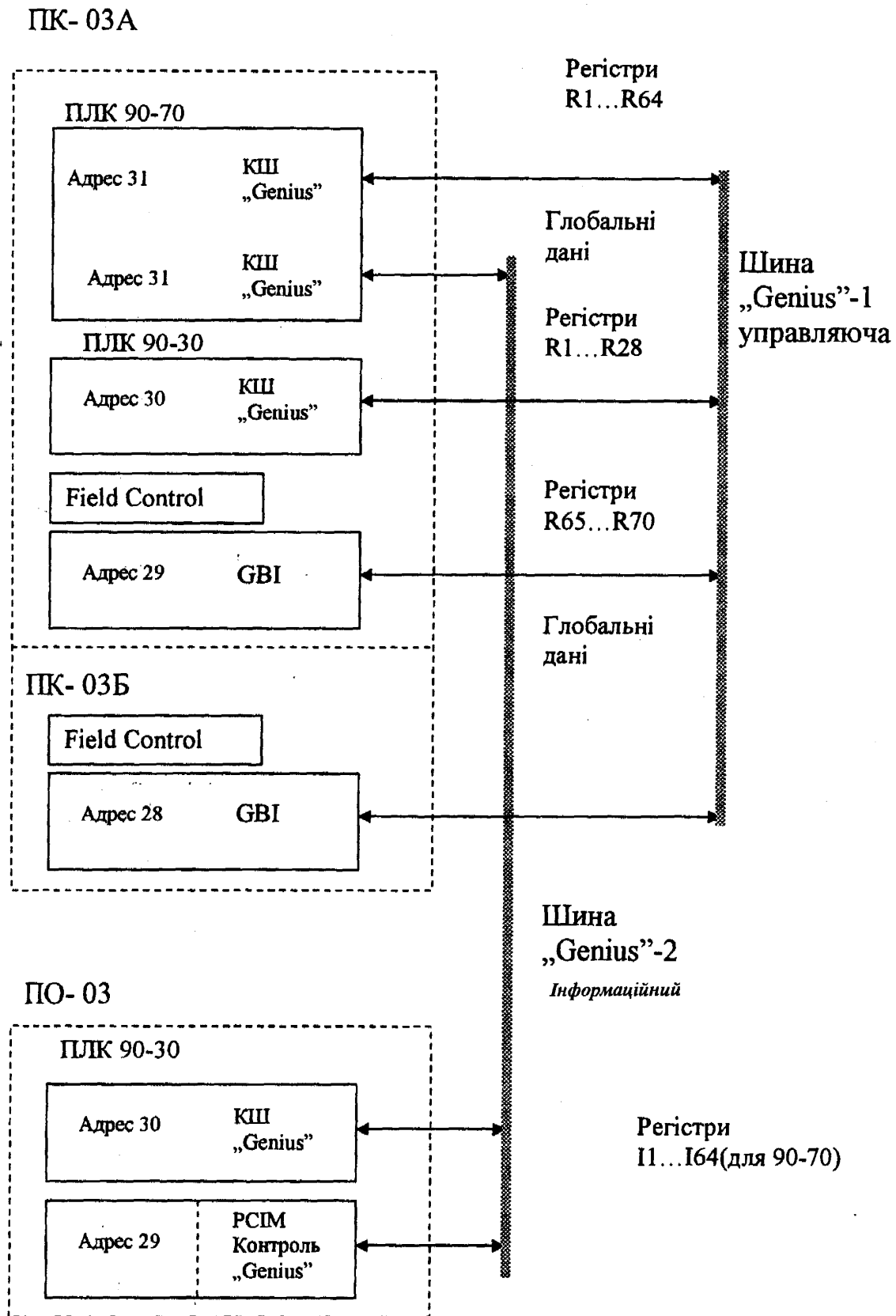


Рисунок 5.3-Організація взаємодії елементів системи по шині “Genius”

Контролери є вільнопрограмовани мікропроцесорними засобами, які програмуються через інтерфейсний канал з персональної ЕОМ або спеціального програматора. 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 привнесеними 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 (в т.ч. ПІД-регулятори), розгалуження та передачі даних. Таким чином, програмні можливості по обробці інформації суттєво розширюються і є достатніми для автоматизації складних технологічних об'єктів, якими є КС.

Автоматизовані робочі місця інженерно-технічного персоналу КС та АРМ диспетчера ЛВУМГ об'єднані у мережу Ethernet при допомозі відповідного інтерфейсного обладнання та програмного забезпечення. Інформаційний зв'язок диспетчерів ЛВУМГ 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.

Слабким місцем АСК КС застарілого взірця є недосконалі вузли обліку паливного та транспортованого газу, що стримує зокрема реалізацію задач оптимального керування. Тут слід скористатись досвідом організації вузлів обліку, наприклад, на КС "Тарутине", де застосовані обчислювачі витрати газу ФЛОУТЕК фірми "Укргазтех" і розгорнуто АРМ обліку газу.

5.3 Програмне забезпечення системи

5.3.1 Аналіз програмного забезпечення верхнього рівня системи

Сучасні системи керування технологічними процесами будуються на базі мікропроцесорної техніки і, тому програмне забезпечення присутнє на всіх рівнях АСУ ТП:

- у промислових контролерах і системах телемеханіки;
- в операторських панелях;
- на операторських станціях;
- на серверах тривоги, архівів, документування,

Останнім часом одержують поширення також інтелектуальні давачі, які укомплектовані мікропроцесорами і інструментальним програмним забезпеченням.

Сучасні інструментальні засоби розробки програмного забезпечення АСУ ТП дозволяють користувачу досягти підвищення продуктивності праці за рахунок наступних технологій:

- об'єднання інструментальних засобів і баз даних проекту для промислових контролерів і операторських станцій (інтеграція SCADA і Softlogic);
- розробка розподіленої АСУ як єдиного проекту;
- використання технологій автоматизованої побудови і настроювання бази даних проекту (автопобудова);
- використання універсальних драйверів і інтерфейсів додатків (OPC-серверів);
- використання стандартних мов програмування;
- уніфікація форматів і інтерфейсів (ODBC, Active, HTML);
- використання інтернет-технологій.

Сама система SCADA і Softlogic складається з двох основних частин - інструментального середовища розробки і виконавчих модулів. Середовище розробки служить для опису проекту, програмування контролера, операторських станцій і створення операторського інтерфейсу. Виконавчі ж модулі виконують усю поточну роботу передбачену в проекті, створеному в середовищі розробки: одержання, обробка, архівування і візуалізація даних. Виконавчі модулі можуть бути або інтегрованими, тобто виконувати кілька вище перерахованих функцій, або спеціалізованими і виконувати яку-небудь одну функцію.

Програмне забезпечення рівня SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) виконує наступні функції:

1) *Візуалізація* – відображення інформації про процес на мнемосхемах у виді числової інформації, трендах, анімації, Active компонентів і т.д. Мнемосхеми можуть відображатися, так званими, «товстими клієнтами» (спеціальними виконавчими модулями – графічними консолями), чи «тонкими клієнтами» (звичайними браузером без необхідності установки клієнтських частин на вилучених робочих станціях). Також забезпечується одержання керуючих впливів від операторів;

2) *Обмін з контролерами в реальному часі* – одержання інформації від контролерів по послідовному інтерфейсі, мережі Ethernet чи по польових шинах, первинна обробка цих даних, а також пересилання в контролери керуючої інформації;

3) *Архівування* – збереження інформації в спеціальні промислові архіви, основними вимогами до яких є *надійність і швидкодія*;

4) *Документування процесу* – створення звітів за заздалегідь створеними шаблонами з наступною їхньою передачею різними каналами обміну інформації (друк, електронна пошта, веб-сайт);

5) *Одержання і передача інформації в інші програмні пакети* – обмін

оперативними й архівними даними зі спеціалізованим програмними продуктами (ПП), або з ПП рівня АСУП;

б) *Неоперативна обробка інформації* – обчислення статистичної інформації, керування повільними процесами;

7) *Керування тривогами* – список тривоги, фільтр подій.

5.3.2 Аналіз існуючих SCADA систем

На даний час для розв'язку типових задач з автоматизації технологічних процесів і для проектуванню верхнього рівня систем може бути використана велика кількість пакетів інструментального програмного забезпечення (ІПЗ). До основних пакетів ІПЗ можна віднести такі: Ultralogik, Genie, Trace Mode, GraphWorX32, TrendWorX32, AlarmWorX32, KontrolWorX32, Сервери OPC, RT-Kernel. Але, треба зазначити, що дані пакети програмного забезпечення можуть суттєво відрізнятися один від одного за багатьма параметрами. Такими параметрами є: основні підтримувані функції інструментального програмного забезпечення по візуалізації контрольованих параметрів, можливості відображення характеру зміни процесів, їхнє архівування тощо. В табл. 5.1 приведена порівняльна характеристика пакетів інструментального програмного забезпечення для задач, які можуть бути вирішені з їхньою допомогою .

Традиційно до складу SCADA входить редактор мнемосхем (мнемосхема зображає основні вузли виробничого процесу, що підлягають контролю). Такий редактор може мати різні назви, але його функції залишаються незмінними - створення мнемосхеми й умовних зв'язків із джерелами даних. Як правило, цей редактор дозволяє виконувати тестовий запуск створеного сценарію. Однак для повноцінної роботи необхідний також окремий виконавчий модуль. Він є другою найважливішою частиною системи. У той час

як редактор мнемосхеми являє собою інструмент розробника, модуль виконання стратегії необхідний замовнику.

Таблиця 5.1 – Порівняльні характеристики деяких інструментальних пакетів, які використовуються для створення АСУ ТП

Пакети інструментального ПЗ	Уltralogik	Genie	Trace Mode	GraphWorX32	TrendWorX32	AlarmWorX32	KontrolWorX32	SIMPLICITY	Сервери OPC	RT-Kernel
Виконувані задачі										
Візуалізація контрольованих параметрів		■	■	■				■		
Архівування, відображення зміни перехідних процесів	■	■	■		■			■		
Повідомлення персоналу про аварійні ситуації		■	■			■		■		
Реалізація функцій автоматичного управління на станції верхнього рівня		■	■				■	■		
Сумісність з OPC			■	■	■	■	■	■	■	
Мережева взаємодія між станціями і контролерами	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Робота через Інтернет			■	■	■	■	■	■	■	■
Взаємодія з локальними ПЗО (пристроями зв'язку з об'єктами)	■	■	■				■	■	■	■
Взаємодія з віддаленими ПЗО	■	■	■					■		■
Програмування автономних IBM PC сумісних контролерів	■		■					■		■
Сумісність з МСК-1131.3	■		■					■		

Крім цих найважливіших компонентів, у складі системи поставляється ряд драйверів, що підтримують роботу того чи іншого устаткування.

Раніше, до появи відкритих загальнодоступних стандартів взаємодії пристроїв, створити драйвер для конкретного устаткування могли хіба що розробники цих апаратних засобів. Однак і зараз самостійна розробка драйвера пристрою – досить важке завдання. Через те найпопулярніші пакети поставляються з великим набором драйверів, наданих постачальниками техніки.

Усі програмні компоненти, що складають основу SCADA, поставляються у вигляді *Active-X*-компонентів. На сьогоднішній день палітра елементів виглядає так: *Trend, Digit, Alarm, Flip, Mirro, Move, Filter, Switch, Level, Switch button, Around*. Практично всі ці елементи призначені для виведення визначених технологічних елементів чи створення анімаційних ефектів.

5.3.3 Опис та основні можливості SIMPLICITY

Фірма GE Fanuc є провідною у світі фірмою по розробці й виробництву апаратних і програмних засобів для автоматизації технологічних процесів. Програмно-технічні засоби GE Fanuc цілком орієнтовані на розв'язання задач клієнта, забезпечуючи його комплексним рішенням, але зберігаючи можливість вибору за рахунок "відкритої" архітектури. Сьогодні на ринку програмних продуктів SCADA у світі є декілька конкурентноздатних продуктів. Але, безумовно, серед них провідне становище належить SIMPLICITY. З 1971 року веде свою історію програмний продукт, що сьогодні працює в середовищі операційних систем: UNIX, AIX, VMS, HP UX. Тільки SIMPLICITY працює на комп'ютерних платформах RISC HP, IBM, VAX, DEC-Alpha, Intel. Лідер технології клієнт/сервер SIMPLICITY забезпечує максимальну інтеграцію наявних ресурсів підприємства. Програмне забезпечення дає можливість

швидкої розробки проекту, скорочуючи вартість розробки і підвищуючи конкурентноздатність системи.

Масштабованість SIMPLICITY дозволяє виконувати контроль і керування процесами як із локальної машини, так і супервізорне керування чи збір даних масштабу підприємства . Програмне забезпечення поєднує всі переваги легкого у використанні, інтуїтивного графічного інтерфейсу з могутніми новими засобами керування й розробки типу: System Sentry (Адміністратора рапортів), Action Calendar (календар дій) і Report Manager (контроль над системою). SIMPLICITY НМІ дає фірмам-виробникам комплектного устаткування, інтеграторам і кінцевим користувачам більше волі у виборі, знижує проектний ризик і забезпечує швидше запровадження в дію проекту.

Динамічна графіка – графіка SIMPLICITY з можливістю використання 16 мільйонів кольорів, масштабованими зображеннями й анімацією дозволяє створювати динамічні екрани, що представляють процес виробництва. Використовуючи панель інструментів, можна вирівнювати, обертати, змінювати контури, малювати і створювати групи об'єктів, редагувати, копіювати й стирати, пересувати об'єкти по екрану. SIMPLICITY надає різні об'єкти й шаблони, а також бібліотеку графічних об'єктів для різних галузей промисловості. Графіка SIMPLICITY підтримує OLE і OCG, Object Linking і Embedding, стандарти Microsoft. Можна включити у графічні екрани наступні додатки:

- таблиці й графіки з Excel;
- рапорти з баз даних SQL чи Access;
- картинки bitmap;
- відео й аудіо кліпи;
- графіки, алярми і т.д. з інших додатків пакета SIMPLICITY.

Імпорт метафайлів дозволяє одержувати об'єкт із AutoCAD чи PowerPoint, який потім можливо анімувати.

Генерація й керування алярмами – GE Fanuc створив інструмент керування алярмами. Він являє собою об'єкт OLE. Вікно алярмів можливо надбудувувати й вбудувувати в графічний екран. Користувач вибирає інформацію про алярми, яку необхідно бачити оператору. Можливо змінювати розміри вікна, стилі й тексти алярмів.

Просто і швидко аналізувати зібрані параметри - це важлива характеристика системи керування й моніторингу. Модуль трендів є об'єктом керування ОСХ і може бути вбудований у графічний екран. На відміну від інших пакетів НМІ, у даному модулі не обмежена кількість графіків на один об'єкт тренда. Крім того, один модуль трендів може мати відразу кілька одночасних джерел надходження даних, включаючи поточні дані, дані зібрані попереднього разу і дані збережені у файлі. Для кожного графіка можливий свій масштаб. Можливість змінювати конфігурацію трендів у момент роботи модуля виконання, робить його привабливішим для інженера.

Модуль Basic Control – модуль Basic Control Engine дозволяє інтегрувати мову Visual Basic у SIMPLICITY НМІ для написання власних програмних модулів. Користувач може створювати програмні блоки, що базуються на системних подіях, алярмах, змінних із бази даних чи конкретних діях оператора. За допомогою створення модулів на Visual Basic можна швидко розробити свій додаток до конкретної задачі.

Обмін даними з базою даних – пакет SIMPLICITY підтримує обмін із зовнішніми системами керування базами даних через ODBC. Стандартний інтерфейс надає розробнику свободу вибору.

Панель керування змінними – панель керування надає список змінних у вашій системі, із можливістю одержання динамічної інформації про значення змінних і статусу алярмів. Панель керування змінними надає можливість:

- переглядати локальні й віддалені змінні;
- установлювати локальні й віддалені змінні;
- дозволяти й забороняти генерацію алярмів;

- модифікувати межі алармів.

За допомогою панелі керування змінними можна фільтрувати змінні, сортувати в залежності від імені, пристрою надходження, ресурсів асоційованих із змінною і т.д.

Доступ у реальному часі до найбільш важливої інформації – цілісність даних дуже важлива для автоматизації керування процесами, і пакет SIMPLICITY розроблений таким чином, щоб одержати всі переваги від швидкісного збору й передачі інформації. Грунтуючись на 30 літньому досвіді, GE Fanuc забезпечує стратегію передачі даних як у рамках одного комп'ютера (від задачі до задачі), так і по мережі від одного комп'ютера до іншого. Архітектура - клієнт/сервер дозволяє вирішити цю задачу оптимально.

Гаряче резервування – SIMPLICITY НМІ надає можливості гарячого резервування, що забезпечують автоматичне переключення з первинної системи на вторинну систему у випадку відмови. Гаряче резервування - це не просто дві системи, а єдиний комплекс, що паралельно збирає актуальні дані на два зв'язаних сервери одночасно. Змінні, аларми й інші параметри зберігаються синхронно в двох системах, тим самим зменшується час реакції й відновлення работоздатності у випадку відмови основного сервера. Використовуючи резервування по кабелях Ethernet і дублювання (троювання) контролерів, ви одержуєте супернадійну систему керування. Для OS Windows NT теоретичний час переходу на резервний сервер складає 10 мілісекунд.

Програмне забезпечення CONTROL – створене для роботи під Windows і служить для програмування та конфігурування програмованих логічних контролерів фірми GE Fanuc. Цей продукт дозволяє значно знизити витрати й час розробки проекту. CONTROL дозволяє виконати задачу конфігурації контролера дуже легко, представляючи в графічному виді стан кошика, блока живлення й інших модулів контролера. Програмування контролерів Series 90-70 і Series 90-30 виконується з використання релейних діаграм (LD), послідовності функціональних блоків (SFC) і інших мов, що відповідають стандарту IEC

1131-3. Робота через TCP/IP Ethernet, забезпечує швидкий і зручний доступ до всіх ресурсів системи.

Не зупиняючись на перевагах CONTROL, важливо відзначити його інтеграцію з пакетом SIMPLICITY HMI. Ця особливість комплексного підходу дозволяє мати цілісну проектну базу даних, як для змінних контролера, так і програмного забезпечення HMI. Розробник одержує комплексний інструмент, що забезпечує надійніший контроль над проектом, що виключає багато проблем, зв'язаних з імпортом, чи експортом, повторним введенням конфігураційних параметрів. Можливе динамічне редагування в режимі on-line, при цьому дані автоматично передаються в іншу задачу. Програмне забезпечення CONTROL і SIMPLICITY HMI можуть обмінюватися з контролером по одній лінії передачі, заощаджуючи, таким чином, устаткування.

Інструмент розробника (Integrator ToolKit) включає все необхідне для розробки драйверів зовнішніх пристроїв, систем алярмів, доступу до актуальної бази даних на рівні API операційної системи.

Модуль доступу через Інтернет (WebGateway) надає доступ через Інтернет до бази даних SIMPLICITY. Цей модуль сконфігурований для роботи з Microsoft Internet Server. Використання модуля доступу через Інтернет дозволяє створити Web документ (у стандартному html форматі), що буде представляти дані з SIMPLICITY у текстовому виді. Ви можете визначати стан процесу в графічній формі у виді bitmaps чи динамічно через Active.

Інструмент для перегляду об'єктів SIMPLICITY надає доступ до нової бібліотеки, більш ніж у 2000 індустриальних графічних символів і шаблонів. Перегляд об'єктів - могутній інструмент, що дозволяє легко вибирати, "drag, and drop" у ваш екран будь-який з тисяч об'єктів, що є в бібліотеці. Ця бібліотека в даний час містить об'єкти від Reichard Symbol Factory, а також шаблони SIMPLICITY. Інструмент настільки могутній, що символні об'єкти можна навіть тягти й уставляти в інші додатки Microsoft типу Word чи Powerpoint. Що

ще раз доводить міць і гнучкість відкритого підходу системи GE Fanuc до програмного забезпечення розробника. З відкритим підходом системи, можна легко додавати до бібліотеки, створені в SIMPLICITY чи сторонні об'єкти Active.

Приведені функціональні можливості інструментального пакета, перевірена надійність його роботи на об'єктах ДК “ Укртрансгаз”, повна програмна сумісність з технічними засобами GE Fanuc, поміркована вартість – все це робить його привабливим для реалізації верхнього рівня системи оптимального керування КС Богородчанського ЛВ УМГ.

5.4 Структура спеціального програмного забезпечення

Відображення інформації про хід технологічного процесу на автоматизованому робочому місці змінного інженера – технолога та диспетчера реалізується при допомозі базового програмного забезпечення SIMPLICITY HMI for Windows NT (працює під операційною системою Windows NT), яка обмінюється з прикладними програмами розробленими для кожної КС та окремих агрегатів . SIMPLICITY HMI є багатофункціональним програмним продуктом фірми “GE FANUC”, яке представляє собою HMI/SCADA-систему для розробки програмного забезпечення верхнього рівня систем керування та програмування контролерів , які підтримують релейно – контактний план.

Прикладна програма забезпечує функції вибору та відображення інформації на екрані монітора АРМ. За допомогою функціональних клавіш, які розміщені на віртуальній передній панелі (оглядовому відеокадрі), оператор може викликати відеокадри параметрів, мнемосхем, пультів, графіків, щоденників подій та інше.

Система вікон створена в графічному середовищі Windows NT за допомогою програмного пакету SIMPLICITY HMI for Windows NT і Windows 9x дозволяє зручно відслідковувати технологічний процес у реальному

масштабі часу. В кожному вікні відображається інформація в текстовому та графічному вигляді, а також є можливість формувати архіви та алярми.

На рівні диспетчера ЛВУМГ, крім традиційного прикладного, розроблене спеціальне програмне забезпечення розв'язку оптимізаційної задачі (рис.5.4).

Програмне забезпечення задачі оптимізації оформлене у вигляді прикладного програмного модуля, в який інтегрована низка програмних продуктів, розроблених у середовищах Mathcad, Matlab та Excel. Всі програмні продукти, об'єднані інтегратором написаним на об'єктно-орієнтованій мові Visual Basic. Він оформлений у вигляді об'єктного вікна в SIMPLICITY HMI (оптимізація роботи КС).

На рівні диспетчера ЛВУМГ концентрується інформація про технологічні параметри роботи компресорних агрегатів усіх КС та параметри навколишнього середовища. Інформація доповнюється кожних дві години і формується у вигляді Excel-таблиць посезонно (у відповідності до пори року) у файл архівування і служить для адаптації математичних моделей статички агрегатів. Дана інформація за вимогою диспетчера (віртуальна кнопка в оптимізаційному відеокадрі) автоматично передається на обробку в блок розрахунку моделей. Підготовка, проміжна обробка та розрахунок коефіцієнтів реальних поліноміальних моделей статички усередненої групи компресорних агрегатів трьох КС Богородчанського ЛВУМГ, виконується в пакеті Mathcad. Оцінки коефіцієнтів математичних моделей записуються у файли даних і використовуються в оптимізаційному блоці. Сезонна адаптація дозволяє суттєво підвищити точність математичного опису роботи компресорних агрегатів. Перелік параметрів та періодичність їх архівування для роботи оптимізаційного блоку представлені в табл. 5.2-5.3.

Оптимізаційний блок розв'язує задачу мінімізації енергозатрат на привод паралельно працюючих різнотипних компресорних агрегатів з врахуванням завдання на перекачку та низки обмежень на режимні параметри. Загальна задача оптимізації шляхом декомпозиції розбита на два етапи: знаходження

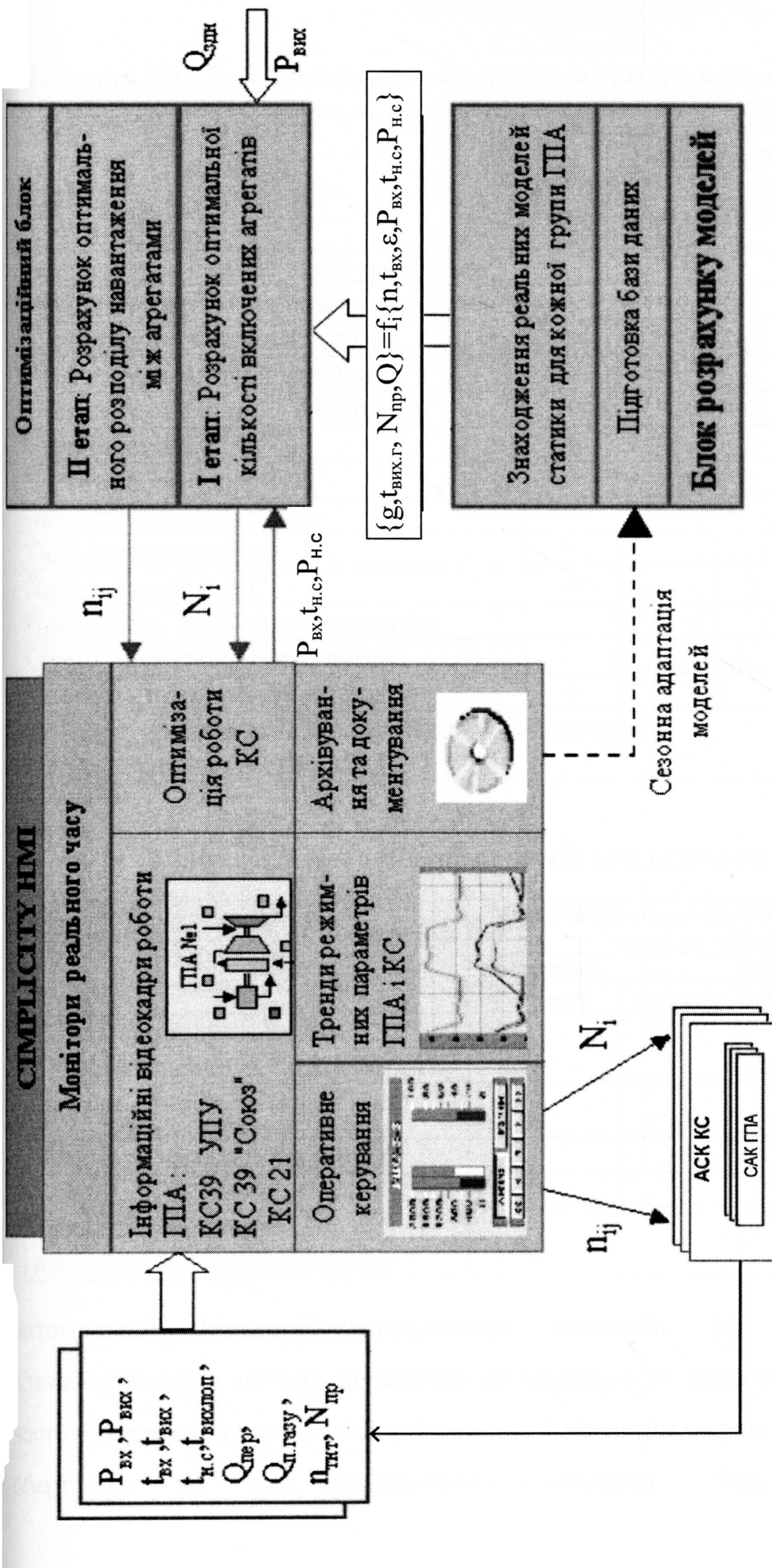


Рисунок 5. 4- Структура програмного забезпечення задачі оптимізації роботи КС

Таблиця 5.2 - Інформація для сезонної адаптації математичних моделей

Параметри	Інформація для архівування по типам агрегатів				Періодичність
	газотурбінні		електроприводні		
	група	агрегат	група	агрегат	
Температура газу на вході нагнітача		+		+	Кожних 2 години
Температура газу на виході нагнітача		+		+	
Температура вихлопних газів		+			
Тиск газу на вході в нагнітач		+		+	
Тиск газу на виході з нагнітачів	+	+	+	+	
Ступінь стиску	+	+	+	+	
Частота обертання ТНТ		+		+	
Витрата паливного газу	+				
Тиск паливного газу	+				
Продуктивність КС	+		+		
Потужність споживання приводу			+	+	
Струм навантаження приводу			+	+	
Кількість працюючих агрегатів	+		+		
Температура і тиск навколишнього середовища по Богородчанському ЛВУМГ					

Таблиця 5.3-Поточна інформація для задачі оптимізації

Параметри	Місце використання інформації в оптимізаційній задачі по типам агрегатів			
	газотурбінні		електроприводні	
	обмеження	критерій	обмеження	критерій
Загальна продуктивність Богородчанської КС (задається)		+		+
Ступінь стиску КС(задається)	+	+	+	+
Тиск газу на вході нагнітача	+	+	+	+
Температура газу на вході КС	+	+	+	+
Температура і тиск навколишнього середовища	+	+	+	+

оптимальної кількості працюючих агрегатів N_i у кожній групі для забезпечення об'єму перекачки не меншого за заданий при номінальних частоті обертання нагнітачів; оптимальний розподіл навантаження за частотою обертання n_{ij} між працюючими агрегатами. Запуск кожного етапу

здійснюється віртуальними кнопками оптимізаційного вікна . Там же задається в контекстних меню необхідні дані для задачі оптимізації: тарифи на електроенергію та спалюваний газ , запланований об'єм перекачки, тиск на виході Богородчанської КС, ресурс оптимізації по кількості робочих агрегатів тощо.

Оптимізації розподілу навантаження в межах окремої КС, із врахуванням індивідуальних технічних характеристик ГПА в групі, можна досягнути з використанням патентованої технології [77] екстремального регулювання на базі програмно-технічних засобів, яка буде опробувана на КС “Ужгород” та КС “Долина” УМГ “ Прикарпаттрансгаз”.

Таким чином, запропонована система оптимального керування групою КС із різнотипними ГПА, які працюють паралельно, дозволяє розв'язати задачу мінімізації енерговитрат на привод, шляхом перерозподілу навантаження між ЛВУМГ. Запропонована структура мікропроцесорної АСК Богородчанської КС акумулює досвід ДК “ Укртрансгаз” та НДПАСУтрансгаз по створенню розподілених систем керування, має масштабованість і відкритість, що дозволяє поступову модернізацію системи, вона забезпечує інформаційну підтримку оптимізаційної задачі та реалізацію оперативного керування в режимі реального часу при допомозі HMI/SCADA-систем та контролерних мереж.

Подальший розвиток АСК можливий у напрямку уточнення математичних моделей груп ГПА, методик сезонної адаптації, постановки та розв'язку задачі оптимізації компресорного цеху шляхом застосування програмно - технічних засобів чи на основі індивідуальних математичних моделей ГПА.

5.5 Інтегратор оптимізаційної задачі

Об'єднання окремих програмних модулів оптимізаційної задачі здійснюється спеціальною програмою-інтегратором . Для розробки програми – інтегратора використано мову об'єктно-орієнтованого програмування Visual Basic for Applications, інтегровану в MS Excel 2000. Перевагою VBA як мови

програмування, вбудованої в MS Excel, 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 MathCAD, MATLAB, MS Excel і зв'язок із SCADA – системою.

Це завдання було розв'язане наступними чином:

– зв'язок із програмним продуктом MathCAD створюється за допомогою програмного оголошення функцій, як глобальних для Windows.

Приклад програми подано нижче:

```
'Декларація функцій як глобальних для WINDOWS
```

```
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
```

Після оголошення глобальних функцій здійснюється запуск вікна MathCAD з відповідною програмою обробки даних:

```
'активізація програми MATHCAD
```

```
ActiveSheet.Shapes("Object 5").Select
Selection.Verb
```

```
'пошук вікна програми MATHCAD
  Dim sWindowName As String
  sWindowName = "Mathcad Professional -
[KC-21-UNION1]"
  hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)

'закриття вікна MATHCAD
  lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
  lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
```

Даний зразок є частиною програми знаходження реальних моделей статички, яка буде розглянута дещо пізніше;

- керування роботою і передача даних в MATLAB здійснюється за допомогою надбудови модуля Excel Link в MS Excel 2000, що поєднує програми розроблені в них в 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. Структурна схема взаємодії показана на рис. 5.5;

- зв'язок із верхнім рівнем здійснюється через DDE (Dynamic Data Exchange) обмін. MPB може виступати як як DDE-сервер, так і DDE-клієнт і підтримує три режими обміну: **ADVISE**, **POKE**, **REQUEST**. В даному випадку SIMPLICITY є DDE-сервером, і монітор реального часу виконує наступні операції:

- a. посилає реальні значення каналів програмі (MS Excel) зі своєї ініціативи (режим **ADVISE**);
- b. змінює значення атрибутів каналів по команді іншої програми (MS Excel) – (режим **POKE**);

с. посилає значення будь-яких атрибутів каналів за запитом іншої програми (MS Excel) – (режим **REQUEST**).

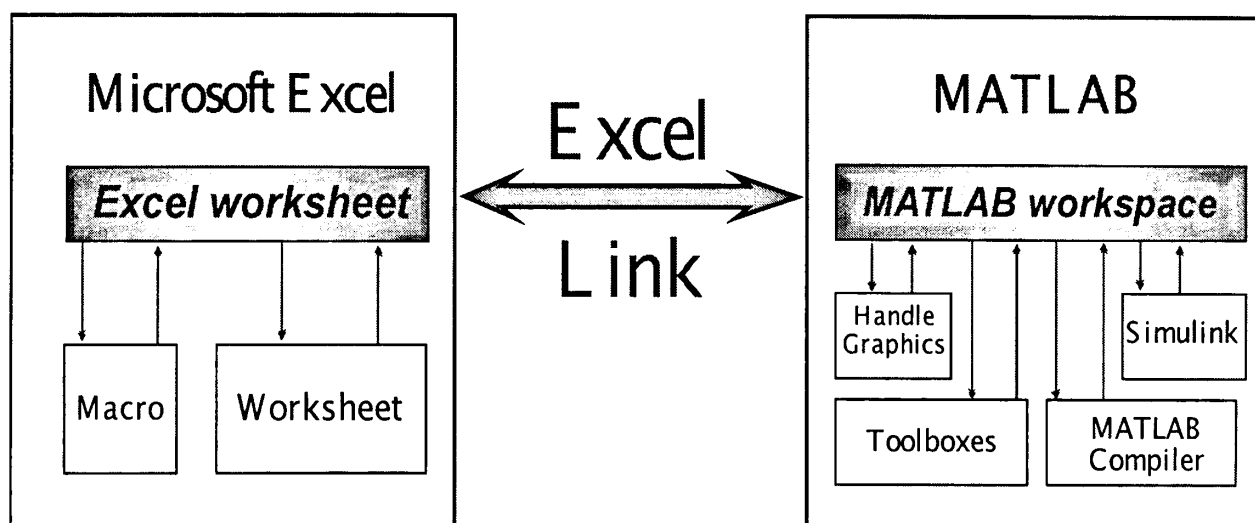

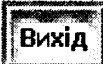


Рисунок 5.5 – Структурна схема взаємодії MS Excel ↔ MATLAB через Excel Link

Запуск інтегратора здійснюється натисканням кнопки в стандартній панелі інструментів  MS Excel чи за викликом із програми верхнього рівня.

Щоб припинити роботу інтегратора оптимізаційної задачі, потрібно натиснути відповідну кнопку  в нижній частині вікна інтегратора.

Загальний вигляд інтегратора приведений на рис. 5.6. Це є основна форма, яка має робочу назву frmOptimi. Однією з основних властивостей форми є властивість Show Modal; при заданні їй значення True, дозволяє зробити форму модальною, тобто поки форма frmOptimi відкрита, інші програмні компоненти залишаються недоступні. На цій формі розміщені такі елементи управління: Label (надпис), TextBox (поле), Frame (рамка), CommandBatton (кнопка), MultiPage (набір сторінок).

Елемент управління типу Label призначений для відображення довідкової, пояснювальної інформації, а саме назви і одиниці виміру параметрів задачі оптимізації.

Елемент управління – MultiPage дозволяє відображати декілька сторінок, що містять різну інформацію. Даний елемент управління використано для відображення інформації по трьох КС (MultiPage2) і вхідні параметри для оптимізаційної задачі (MultiPage1). Кожен з трьох об'єктів MultiPage містить колекцію Page, де розташовані свої елементи управління Label, TextBox чи Frame.

Елемент управління – Frame використано для об'єднання типових параметрів та інших елементів управління. Так, об'єднано під однією назвою – “Прогнозовані значення параметрів ГПА” такі величини: температура газу на вхід в магістральний трубопровід, температура вихлопних газів, витрата паливного газу для КС-21 “СОЮЗ” і КС-39 “У-П-У”, і для КС-39 “ПРОГРЕС” – потужність електроприводу, температура газу на вхід в магістральний трубопровід. Також об'єднано два елементи управління типу CommandButton – під назвою “Оптимізація”.

Результати випробування програми оптимізаційної задачі:

випробування проводилось на обладнанні:

- MB – *SL-63AV⁺ VIA APOLLO PRO Socket-370;*
- CPU – *Intel Celeron 566 Mhz PPGA;*
- RAM – *SDRAM 128 PC-133 PQI.*

час роботи оптимізаційної задачі першого етапу – 25 сек;

час роботи оптимізаційної задачі другого етапу – 85 сек;

час роботи при обчисленні моделей – 125 сек;

5.5.1 Підтримка розв'язку оптимізаційної задачі 1-го етапу

Вихідними даними для розв'язку оптимізаційної задачі 1-го етапу є такі величини, що задаються в головному вікні програми у відповідних текстових полях:

– із загальностанційних параметрів – об'єм перекачки, м³/год (в TextBox – txtZadoper);

– тарифи на енергоресурси – ціна паливного газу за 1000 м³ (в TextBox txtCg), ціна електроенергії за 1 кВт/год (в TextBox – txtCe);

Загальностандційні параметри		Тарифи на енергоресурси		Параметри навколишнього середовища	
Тиск газу на вході КС	49 кг/см ²	Температура газу на вході КС	20	Тиск газу на вході КС	20 град Цельсія
Тиск газу на виході КС	66 кг/см ²	Об'єм перекачки	6500000	Об'єм перекачки	6500000 м ³ /год


КС-39 "Прогрес"		КС-21 "Союз"		КС-39 "У-П-У"	
Ресурс оптимізації (кількість працюючих агрегатів), Ншт					
1					
Оптимальна кількість агрегатів, Nopt		Оптимальні оберти ТНТ, n		Навантаження ГПА, n/гн	90.81 %
Прогнозовані значення параметрів роботи ГПА					
t г. вих.	43.56 град Цельсія	Б п.г.	181.07 т.м3/доб	Економічні затрати на привід	
t вихлопу	523.63 град Цельсія	1.17		грн за 1000 м ³	

Загальні оптимальні затрати	1.66	грн за 1000 м ³
-----------------------------	------	----------------------------

Оптимізація		
Обнулення вікна	Модель КС	Етап 1
		Етап 2
		Вихід

Рисунок 5.6 – Загальний вигляд об'єктного вікна програми – інтегратора

– ресурс оптимізації (кількість працюючих агрегатів) в TextBox – txtRes1 для КС-“У-П-У”, txtRes2 для КС-21 “СОЮЗ”, txtRes3 для КС-39 “ПРОГРЕС”.

Запуск оптимізаційної задачі здійснюється елементом управління CommandBatton – cmdKrok1,  натисканням на який запускається програма пошуку рішення в MS Excel. 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 = txttvq.Value
    Worksheets("Лист2").Activate
    'Вибір і обрахунок ступеня стиску 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$36", MaxMinVal:=2, ValueOf:="0",_
    ByChange:="$B$26:$D$26"
    SolverSolve
```


'Пересилання отриманих даних із головного Листа1 на чорновий
'і формування з нього масиву даних для пересилки в MatLAB

```

Range("B26:D26").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Sheets("Лист2").Select
Range("B25:D25").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone,
SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
:
:
:
'Обрахунок ступеню стиску газу
Range("B41").Select
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

Оптимальна кількість агрегатів, Нопт 2

5.5.2 Підтримка розв'язку оптимізаційної задачі 2-го етапу

Вихідними даними для розв'язку оптимізаційної задачі 2-го етапу є такі величини, що задаються в головному вікні програми у відповідних текстових полях:

- із загальностанційних параметрів – вхідний і вихідний тиски в магістральному трубопроводі (в TextBox – txtPvg, txtPvux);
- параметри навколишнього середовища – (в TextBox txttc).


```

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 frmOptimi
'закріплення текстовим полям значень певних комірок
Worksheets("Лист2").Activate
txtTg1.ControlSource = "b74"
:           :           :
:           :           :
:           :           :

txtx2.ControlSource = "b72"
txtx3.ControlSource = "b73"
End Sub

```

Після завершення 2-го етапу оптимізаційної задачі отримуємо результат, який з'являється в текстовому вікні: прогнозовані значення параметрів роботи ГПА, економічні затрати на привід, навантаження ГПА, оптимальні оберти нагнітача, загальні оптимальні затрати.

5.5.3 Сезонна адаптація моделей ГПА

В процесі експлуатації ГПА та зі зміною пір року програма - інтегратор дозволяє проводити за бажанням персоналу КС адаптацію усереднених параметрів математичних моделей ГПА з використанням реальних значень режимних параметрів за відповідні періоди роботи минулого року. В

основному об'єктному вікні інтегратора є кнопка "Модель КС", при допомозі якої з'явиться підвікно корекції параметрів моделі за даними (рис.5.7), які сформовані модулем архівування SIMPLICITY в MS Excel. Даний макрос формує сценарій режиму адаптацій у такий спосіб.

База даних накопичена в Excel-таблицях у формах приведених в розділі 2 записуються у файли даних, які після запуску даного макроса стають доступними для обробки в MathCAD. При цьому є можливість повного автоматичного перерахунку моделей ГПА по всіх КС, а також селективного вибору необхідної моделі для уточнення її параметрів з використанням відповідних функціональних кнопок вікна.

Повний текст програми-інтегратора приведений в додатку Л.

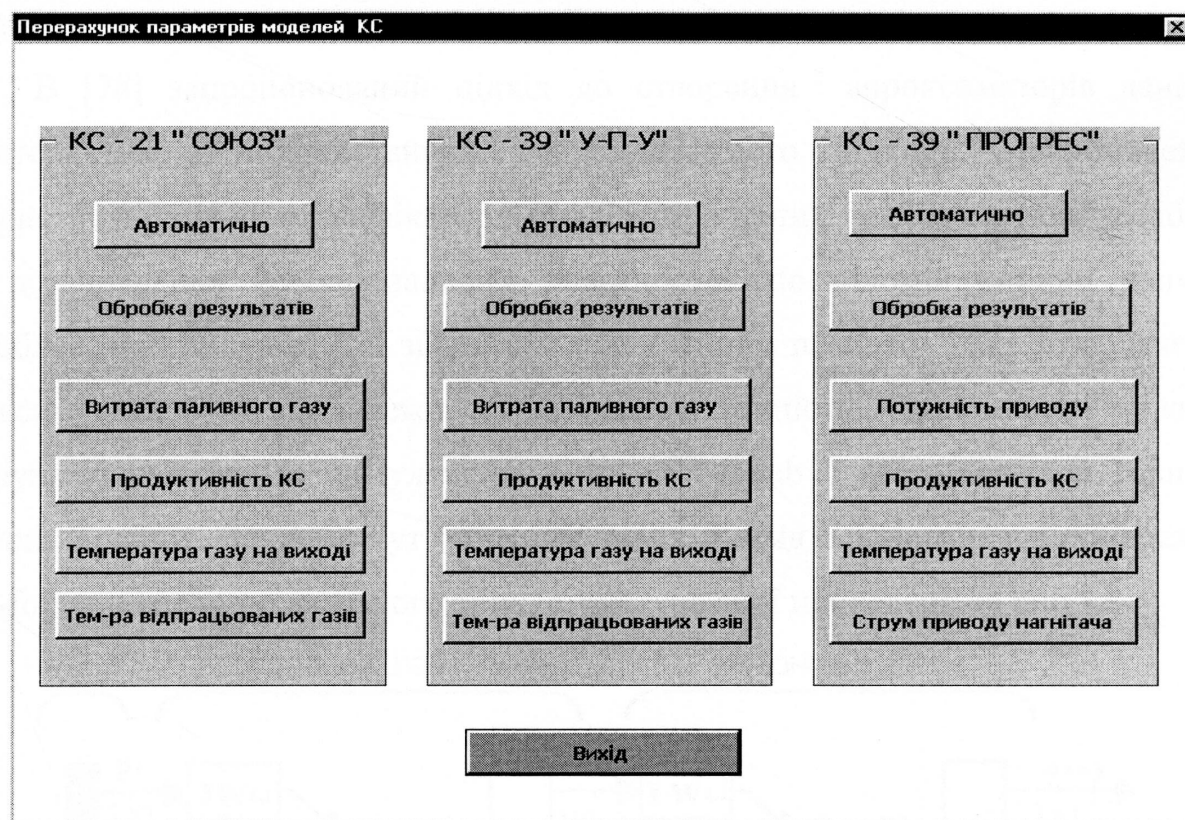


Рисунок 5.7- Об'єктне під вікно корекції параметрів моделей КС

5.5 Розрахунок техніко-технологічних показників роботи ГПА

Однією з підзадач САК КС є розрахунок різноманітних техніко-технологічних показників роботи ГПА та КС, серед них зокрема є такі: температура газу на виході з нагнітача, ступінь стиску в нагнітачі, наявна та ефективна потужність, коефіцієнт корисної дії, ступінь наближення до зони помпажу тощо. Такі розрахунки ґрунтуються, як правило, на знанні паспортних характеристик нагнітачів:

$$\text{відносна приведена потужність} \quad N^* = f(Q_{np});$$

$$\text{політропний коефіцієнт корисної дії} \quad \eta_{пол} = f(Q_{np});$$

$$\text{ступінь стиску} \quad \varepsilon = f(n^*, Q_{np}),$$

де Q_{np} – приведена витрата на всмоктуванні нагнітача ; n^* - приведена частота обертання.

В [78] запропонований підхід до створення апроксиматорів даних характеристик з використанням нейромережевого підходу. Нейромережі використовуються як класифікатори, аналізатори даних та прогнозуючі засоби. Для встановлення функціональних залежностей по відомій вибірці даних розроблені нейромережі " зі зворотнім поширенням помилки", які дозволяють апроксимувати будь-які залежності з бажаною точністю. Дані мережі можна генерувати, навчати та симулювати в пакеті Matlab в інструментарії Neural Network Toolbox. Зокрема тут підтримується, поряд з іншими, нейромережа Feed-forward backprop вказаного типу, структура якої приведена на рис.5.8.

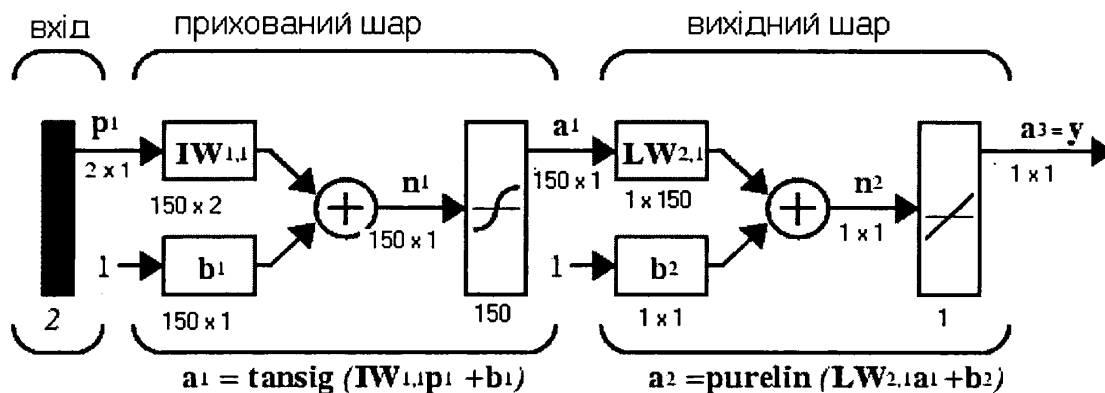


Рисунок 5.8- Структура мережі Feed-forward backprop

Входом мережі є приведена витрата Q_{np} та приведена частота обертання n^* (вектор p_1), а виходом – ступінь стиску E (на рисунку y). Експериментатор задає кількість нейронів у кожному шарі та функції активації. У вхідному шарі застосовані нейрони з функцією активації нелінійного типу *tensing* (сігмоїд-гіперболічний тангенс), а у вихідному шарі – лінійна функція активації *purelin*. Мережа зображена на рисунку має у першому шарі 100 нейронів, а в другому – 1 (мережа типу 100-1). Дана структура синтезована з точністю до вагових коефіцієнтів синапсів (матриці $IW_{1,1}$ та $LW_{2,1}$) і зміщень (вектори b_1 та b_2). Невідомі параметри нейронів налаштовуються шляхом навчання мережі на заданій вибірці (навчальна). Вибірка включає в себе матрицю вхідних параметрів та вихідний вектор, які є результатом табуляції паспортної залежності $\varepsilon = f(n^*, Q_{np})$ для нагнітача РСЛ-804-2, які використовуються на Богородчанській КС. Суть навчання полягає в підборі неурегульованих параметрів мережі у такий спосіб щоб вона давала правильну реакцію з заданою точністю на поданий вхідний вектор p_1 . Даний алгоритм реалізується процедурою навчання *train*. Опробувані всі базові алгоритми навчання, які є в інструментарії *Neural Network Toolbox*. Для насичених нейромереж традиційні пакетні функції навчання, які ґрунтуються на методі градієнтного спуску (*traingd*, *traingdm*) є дуже повільними і не можуть бути використані в нашому випадку. Тому детально досліджувались ефективніші алгоритми швидкого навчання, які відносяться до двох категорій: група евристичних методів (метод зворотного поширення зі змінним коефіцієнтом навчання – *traingda*, *traingdx*; гнучке зворотне поширення – *trainrp*) та група методів числової оптимізації (спряжених градієнтів – *traincgf*, *traincgp*, *traincgb*, *trainscg*; квазі-Ньютоновські – *trainbfg*, *trainnoss*; алгоритм Левенберга-Маркуардта – *trainlm*). Результати ефективності роботи даних алгоритмів навчання приведені в табл.1.

Пробне моделювання нейромереж з структурами 20-1, 50-1, 100-1, 150-1 та 200-1 дозволило встановити, що для прийняттого наближення реакції

мережі на задану вибірку входів (Q_{np}, n^*) необхідно мати у першому шарі не менше 100 нейронів. Кінцево прийнята мережа типу 150-1, яка дає хороші результати апроксимації характеристики нагнітача. Для остаточного навчання мережі відібраний алгоритм поєднаних градієнтів з масштабуванням `trainscg`, який має високу швидкодію та добру збіжність на навчальній вибірці.

Крім двошарових мереж, досліджені складніші – три та чотиришарові з сигмоїдальними функціями активації в перших шарах та лінійною функцією у вихідному шарі. Мережа 50-50-20-10 дає з алгоритмом навчання `trainscg` приблизно такі ж результати що і мережа 150-1, правда для її навчання затрачено у сім разів більше циклів.

Подібні дослідження проведені і при синтезі однопараметричних залежностей $N^*=f(Q_{np})$ та $\eta_{пол}=f(Q_{np})$. Алгоритм навчання реалізований функцією `trainscg`. Підсумкові результати приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4-Результати моделювання однофакторних приведених характеристик нагнітача PCL 804-2

Характеристика нагнітача	Середньо-квадратичне відхилення	Відносна похибка, %	Тип нейромережі	Кількість циклів навчання
$\eta_{пол}=f(Q_{np})$	0.00013	3.2	10-1	2000
	$3.6 \cdot 10^{-6}$	0.5	15-1	2000
	$5.9 \cdot 10^{-8}$	0.05	20-1	340
$N^*=f(Q_{np})$	54.88	3	20-1	1000
	55.4	2.2	25-1	1000
	1.63	0.4	50-1	1000
	0.26	0.15	60-1	1000
	7.46	0.9	50-20-1	1000
	$1.7 \cdot 10^{-5}$	0.0015	50-30-1	573

Одержані залежності використані для розрахунку режимних параметрів нагнітачів. Для цього синтезований алгоритм розрахунку з нейромережною ідеологією. Структура обчислювача приведена на рис. 5.9.

Алгоритм має такі нейромережні вузли :

-розрахунок молекулярної ваги і густини газу при стандартних умовах за результатами хроматографічного аналізу складу природного газу (мережа nnet 1);

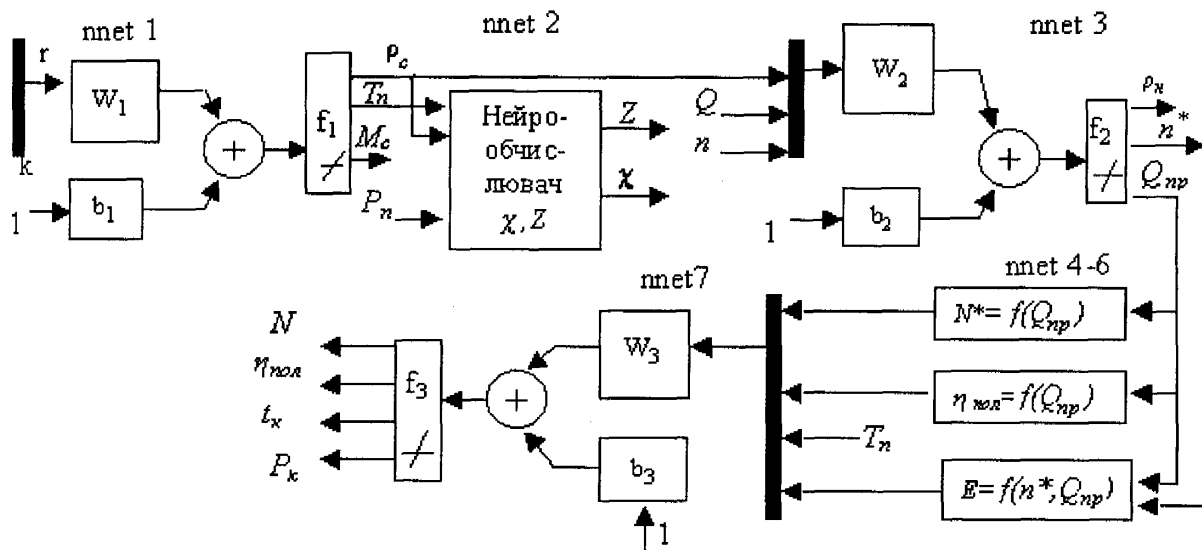


Рисунок 5.9 - Нейромережний обчислювач параметрів відцентрового нагнітача

- обчислення показників стисливості газу Z і показника ізоентропи χ (nnet 2);
- одержання приведених параметрів нагнітача(мережа nnet 3);
- обчислення параметрів ε, N_{np} і $\eta_{пол}$ (мережі nnet 4-6);
- визначення основних режимних параметрів роботи нагнітача(мережа nnet 7).

Мережі nnet 1,3,7 є одношаровими нейромережами з декількома нейронами, які мають лінійні функції активації. Робота такої мережі описується матричним рівнянням $a=f(Wp+b)$, де a, p -відповідно вхідний та вихідний

вектор ; W, b -відповідно вагова матриця та вектор зміщення нейрона. Таким чином вони реалізують наступні обчислення:

$$\text{nnet 1} \quad \begin{bmatrix} \rho_c \\ M_c \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_2 \dots & \rho_{k-1} & 0 \\ \mu_1 & \mu_2 \dots & \mu_{k-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{k-1} \\ t_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 273,15 \end{bmatrix},$$

де ρ_c, M_c, T_n – відповідно густина, молекулярна вага та температура (в К) природного газу;

ρ_i, μ_i, r_i, t_n – відповідно густина, молекулярна вага, об'ємна доля i - компонента в газовій суміші та температура газу(в °C).

$$\text{nnet 3} \quad \begin{bmatrix} \rho_n \\ n^* \\ Q_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_c \\ n \\ Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{де} \left\{ \begin{array}{l} a_2 = \sqrt{\frac{Z_{np} \cdot T_{np} \cdot R_{np} \cdot M_c}{Z \cdot T_n \cdot 8314,4}}; \\ a_3 = \frac{n_n}{n}; \\ a_1 = \frac{P_n \cdot T_0}{T_n \cdot P_0}. \end{array} \right. , \text{ а}$$

$Z_{np}, T_{np}, R_{np}, n_n$ -початкові умови приведення характеристик нагнітача ; T_0, P_0 -стандартні умови розрахунку $\rho_c; T_n, P_n, n, Q$ -вихідні параметри газу і роботи нагнітача; n^*, Q_{np} -приведені параметри нагнітача; ρ_n -густина газу приведена до реальних умов.

$$\text{nnet 7} \quad \begin{bmatrix} N \\ \eta_{пол} \\ t_k \\ P_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N^* \\ \eta_{пол} \\ T_n \\ E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -273,15 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{де} \left\{ \begin{array}{l} b_1 = \rho_n \cdot \left(\frac{n}{n_n} \right)^3; \\ b_2 = E^{\frac{\chi-1}{\eta_{пол} \cdot \chi}}. \end{array} \right. , \text{ а}$$

N -внутрішня потужність, яка споживається нагнітачем; t_k, P_k -відповідно температура і тиск на виході нагнітача.

Нейромережа nnet 2 реалізує двошарову мережу зворотного поширення помилки і має три входи та два виходи. На основі результатів хроматографічних аналізів(глибина два роки) природного газу на

Богородчанській КС, створений масив даних (навчальна вибірка), який дозволила навчити дану мережу для знаходження параметри Z і χ .

Послідовний алгоритм нейрообчислень режимних параметрів відцентрового нагнітача PCL-804-2 опробований при практичних розрахунках режимів роботи нагнітача даного типу і підтвердив збіжність з реальними параметрами. Перевагою даного алгоритму перед традиційними методиками розрахунків у можливості коригування процесу розрахунку параметрів з врахуванням як об'єктивної (за результатами технічного обстеження) так і суб'єктивної (за словесною характеристикою персоналу чи експертів) інформації про реальний стан нагнітача.

На Богородчанських компресорних станціях застосовуються три типи нагнітачів природного газу PCL-804-2, RF 2BB-30 і 650-21-2. Для прогнозних розрахунків техніко-економічних показників роботи ГПА застосовувались традиційні методики розрахунку, які ґрунтуються на табульованих приведених характеристиках нагнітачів, що не дозволяє автоматизувати даний процес без їх апроксимації.

Апроксимація приведених характеристик [79] виконувалась регресійними моделями. Однофакторні залежності відносна потужність та політропний к.к.д оцінювались поліноміальними моделями виду:

$$x = \sum_{i=0}^m a_i \cdot Q_{np}^i,$$

де x – приведена вихідна величина; a_i – параметри моделі; m – порядок полінома.

Оцінка параметрів моделі здійснювалась методом найменших квадратів (МНК). Точність апроксимації оцінювалась такими величинами: середньоквадратичне відхилення та максимальне відхилення.

Двофакторна залежність ступеня стиску наближувалась за МНК та методом Брандона. При цьому в першому випадку структура моделі була такою:

$$\varepsilon = \sum_{\substack{i=0, \\ j=0}}^m a_{ji} \cdot \bar{n}^i \cdot Q_{np}^j, \text{ при } i+j \leq m,$$

де a_{ij} - параметри моделі; m - порядок моделі.

За методом Брандона апроксимуюча функція шукалась в такому вигляді:

$$\hat{x} = m_x \cdot \prod_{j=1}^m f_j(u_j),$$

де m_x -математичне очікування вибірки даних залежної змінної x ;

$f_j(u_j)$ - поліном k -тої степені; u_j - вхідні фактори ; m -кількість вхідних факторів.

В нашому випадку ступінь стиску апроксимується залежністю:

$$\hat{\varepsilon} = m_\varepsilon \cdot f_1(\bar{n}) \cdot f_2(Q_{np}).$$

Розрахунки виконані обома способами з використанням поліномів різних порядків на прикладі нагнітача PCL 804-2 . За результатами досліджень підібрана найкраща модель при оцінці параметрів моделі за методом Брандона. Розрахункові параметри та структура апроксимуючих функцій будуть такими:

$$m_\varepsilon = 1,37906; \quad f_1(\bar{n}) = 0.81085 - 0.3048 \bar{n} + 0.609 \bar{n}^2 - 0.05175 \bar{n}^3;$$

$$f_2(Q_{np}) = 6.6486 \cdot 10^{-5} + 8.51735 \cdot 10^{-3} Q_{np} - 2.563 \cdot 10^{-5} Q_{np}^2 + 3.336 \cdot 10^{-8} Q_{np}^3 - 1.6139 \cdot 10^{-11} Q_{np}^4.$$

Максимальна відносна похибка апроксимації за даним методом складає 1,58%. Кращу апроксимацію забезпечує метод найменших квадратів. Результати оцінки параметрів моделей відтворені в табл .5.5-5.7.

Таблиця 5.5-Результати ідентифікації параметрів моделі політропного коефіцієнта корисної дії $\eta_{пол.} = f(Q_{np})$

Параметри	Компоненти полінома	Значення коефіцієнтів моделі		
		Тип нагнітача		
		PCL-804-2	RF 2BB-30	650-21-2
\hat{a}_0	1	$2,15618 \cdot 10^{-5}$	0,0001736	$3,52129 \cdot 10^{-5}$
\hat{a}_1	Q_{np}	0,00276226	0,01214	0,004997
\hat{a}_2	Q_{np}^2	$-1,02106 \cdot 10^{-6}$	$-7,81245 \cdot 10^{-5}$	$-1,21274 \cdot 10^{-5}$

Продовження табл. 5.5

Параметри	Компоненти полінома	Значення коефіцієнтів моделі		
		Тип нагнітача		
\hat{a}_3	Q_{np}^3	$-3,37867 \cdot 10^{-9}$	$2,36731 \cdot 10^{-7}$	$1,47804 \cdot 10^{-8}$
\hat{a}_4	Q_{np}^4	$2,14693 \cdot 10^{-12}$	$-2,70701 \cdot 10^{-10}$	$-7,85584 \cdot 10^{-12}$
Середньоквадратичне відхилення		$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	0,000589
Максимальне відносне відхилення, %		0,16	0,2	0,09

Висока точність аналітичних наближень приведених характеристик нагнітачів дозволяє використовувати їх для виконання практичних розрахунків режимів роботи компресорів.

Приклад розрахунку показників роботи нагнітачів приведені в додатку М.

Таблиця 5.6 - Результати ідентифікації параметрів моделі приведеної потужності $[N/\rho_n]_{np}=f(Q_{np})$

Параметри	Компоненти полінома	Значення коефіцієнтів моделі		
		Тип нагнітача		
		PCL-804-2	RF 2BB-30	650-21-2
\hat{a}_0	1	-75,91492	492,39367	-50,709935
\hat{a}_1	Q_{np}	2,03819	-3,41427	1,247995
\hat{a}_2	Q_{np}^2	-0,00164225	0,01758	0,000105
\hat{a}_3	Q_{np}^3	$4,07689 \cdot 10^{-7}$	$-2,45886 \cdot 10^{-5}$	$-6,97703 \cdot 10^{-7}$
Середньоквадратичне відхилення		$3,74 \cdot 10^{-1}$	$9,18 \cdot 10^{-2}$	0,3646
Максимальне відносне відхилення, %		0,0797	0,033	0,072

Таблиця 5.7- Результати ідентифікації параметрів моделі ступеня стиску газу $\varepsilon=f(\bar{n}, Q_{np})$

Параметри	Компоненти полінома	Значення коефіцієнтів моделі		
		Тип нагнітача		
		PCL-804-2	RF 2BB-30	650-21-2

Продовження табл. 5.7

Параметри	Компоненти полінома	Значення коефіцієнтів моделі		
		Тип нагнітача		
\hat{a}_{12}	$Q_{np} \bar{n}^2$	-0,000329884	-0,00550922	-0,001287
\hat{a}_{03}	\bar{n}^3	-0,06734	1,01833	0,247587
\hat{a}_{02}	\bar{n}^2	1,01075	-0,0747	0,713397
\hat{a}_{01}	\bar{n}	-0,74958	-1,5829	-1,566563
\hat{a}_{11}	$Q_{np} \cdot \bar{n}$	0,00132214	0,01669	0,004962
\hat{a}_{21}	$Q_{np}^2 \cdot \bar{n}$	$-1,21674 \cdot 10^{-6}$	$-1,81257 \cdot 10^{-5}$	$-3,10438 \cdot 10^{-6}$
\hat{a}_{00}	1	1,64003	2,8932	1,982944
\hat{a}_{10}	Q_{np}	-0,00286388	-0,01781	-0,003461
\hat{a}_{20}	Q_{np}^2	$4,96877 \cdot 10^{-6}$	$4,61112 \cdot 10^{-5}$	$3,48861 \cdot 10^{-6}$
\hat{a}_{30}	Q_{np}^3	$-2,7664 \cdot 10^{-9}$	$-4,40244 \cdot 10^{-8}$	$-1,09841 \cdot 10^{-9}$
Середньоквадратичне відхилення		$2,60 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	0,00147
Максимальне відносне відхилення, %		0,42	0,463	0,2677

Висновки до розділу

1. Існуючі ієрархічні системи керування орієнтовані на автоматизацію окремих КС і ГПА, тому запропонована структура мікропроцесорної АСК кущем КС, які можуть працювати паралельно, що забезпечує апаратну підтримку задачі оптимального розподілу навантаження між компресорними станціями.

2. В результаті аналізу інструментальних пакетів верхнього рівня АСК відібрано для реалізації проекту програмний продукт SIMPLICITY (фірма GE Fanuc), який найкраще інтегрується з технічними засобами цієї ж фірми та має безпосередній об'єктний зв'язок з Excel та VBA, в якому розроблене об'єктно-орієнтоване вікно оптимізаційної задачі.

3. Розроблений прикладний програмний продукт підтримки оптимізаційної задачі в АСК КС, який забезпечує інтегрування двох етапів

розв'язку оптимізаційної задачі та сезонної адаптації моделей статистики груп ГПА за єдиним сценарієм з можливістю запуску зі SCADA/HMI верхнього рівня.

4. Отримані апроксимаційні залежності приведених характеристик ГПА на основі МНК та нейромережевого підходу, які є основою алгоритмів розрахунку техніко- економічних показників ГПА .

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення наукової задачі, яка включає розробку нового методу оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів ГПА і на цій основі синтезовано систему керування, програмне забезпечення якої реалізує розроблені алгоритми. Проведений аналіз відомих методів оптимізації роботи газотранспортних мереж показав, що переважна більшість робіт присвячена вибору оптимальних режимів роботи трубопроводів і практично не розглядались питання оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів ГПА, виходячи із їх поточного стану. На основі аналізу сформульовані невирішені задачі.

2. Виявлені вхідні і вихідні параметри ГПА як об'єкта керування, що дало можливість, на відміну від відомих методів ідентифікації процесу компримування природного газу, врахувати вплив навколишнього середовища на технологічні параметри процесу і тим самим підвищити точність емпіричних моделей.

3. Отримані емпіричні моделі за допомогою різних методів – МНК, сингулярного розкладу матриці Фішера, ортогоналізації та з використанням теорії нейромереж, що дало можливість побудувати адекватні процесу компримування газу математичні моделі.

4. Формалізовано задачу оптимального керування роботою багатоцехових КС з різними типами приводів ГПА, в структуру якої входить критерій оптимальності, обмеження на топологічну структуру КС та на керуючі дії, що дало можливість обґрунтовано вибрати стратегію розв'язку задачі оптимального керування.

5. Розроблений метод розв'язку задачі оптимального керування роботою багатоцехових КС з різними типами приводів ГПА допускає, що така задача вирішується як дворівнева – на першому із них обчислюється кількість агрегатів у кожному компресорному цеху, а на другому – вибирається

частота обертання ротора відцентрових нагнітачів, що приводить до зменшення власних затрат на компримування газу до 2 %.

6. Розроблені алгоритми та програмне забезпечення задачі оптимального керування роботою багатоцехових КС з різними типами приводів ГПА, які лягли в основу синтезу оптимальної системи керування процесом компримування газу і яка враховує як поточний стан об'єкта, так і вплив зовнішнього середовища на роботу компресорних агрегатів.

7. Система оптимального керування роботою багатоцехових компресорних станцій з різними типами приводів випробувана в умовах Богородчанського ЛУМГ. Очікуваний економічний ефект становить 2 млн. 797 тис. гривень за рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Копилов В.А. Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України. // Нафта і газ України. Збірник наукових праць. Матеріали 6-ої Міжнародної наукової конференції.-Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада, 2000р., том 1.-с.9-14.
2. Говдяк Р. М., Руднік А. А. Стан і напрямки розвитку трубопровідного транспорту газу в Україні. // Нафта і газ України. Збірник наукових праць. Матеріали 6-ої Міжнародної наукової конференції.-Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада, 2000р., том 1.-с.38 - 41.
3. Берман Р.Я. Паркратов В.С. Автоматизация систем управления магистральными газопроводами. Л. : Недра, 1978, 159 с.
4. Комягин А.Ф.; Ткаченко Н.В. Динамический расчет систем автоматического регулирования компрессорных станций магистральных газопроводов // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный сб.-М.: ВНИКОЭНГ.-№ 4.- с.22-31
5. Шнеэ Я.И., Капинос В.М., Котляр И.В. Газовые турбины. Термодинамические процессы и теплообмен в конструкциях.-Киев: Вища школа, 1976.-296с.
6. Трубопровідний транспорт газу./ М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків, Д. Ф. Тимків, Л. С. Шлапак, О. М. Ковалко. – К.: Арена-Ево, 2003. – 600 с
7. Газотурбинные установки. Конструкции и расчет: Справочное пособие /Под общ. ред. Л.В.Арсеньева и В.Г.Тырыжкина.-Л.: Машиностроение, 1978.-232с.
8. Теплотехника. Учебник /Под общ. ред. В.Н.Крутова.-М.: Машиностроение, 1986.-432с.
9. Синицын С.Н., Сухарев М.Г., Леонтьев Е.В. Расчет режимов работы компрессорных станций магистральных газопроводов на ЭВМ. Газовая промышленность, 1966, № 12, с. 17-19.
10. Альбом приведенных характеристик нагнетателей Невского машиностроительного завода им. В.И.Ленина.М., ВНИИгаз, 1964.

11. Немудров А.Г., Черников В.И. Расчёт режимов работы газопроводов методом определения оптимальных характеристик турбоагнетателей.// Газовая промышленность, 1966, № 3
12. Синицын С.Н., Сухарев М.Г., Леонтьев Е.В. Применение вычислительных машин для гидравлических расчетов магистрального газопровода. / Тр. ВНИИгаз. “Транспорт природного газа”, 1967.
13. Определение параметров газопровода и компрессорных станций методом совмещения их приведенных характеристик./ С. Н. Синицын, И. В. Барцев, Н. М. Конюхова, Е. В. Леонтьев. В кн. Транспорт природного газа. Труды ВНИИгаз, выпуск № 29/37, М.: Недра, 1967. – С. 245 – 253.
14. Синицын С. Н., Барцев И. В., Леонтьев Е. В. Влияние параметров природного газа на характеристики центробежных нагнетателей. В кн. Транспорт природного газа. Труды ВНИИгаз, выпуск № 29/37, М.: Недра, 1967. – С. 253. – 261.
15. Гарляускас А.И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. М., Недра, 1975.
16. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Оптимизация систем транспорта газа. М., Недра, 1975.
17. Панкратов В.С, Берман Р.Я. Разработка и эксплуатация АСУ газотранспортными системами. –Л.: Недра, 1982
18. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских В.Е. Оптимальное развитие систем газоснабжения.- М., Недра, 1981.- 294с. Паркратов В.С, Берман Р.Я.
19. Загоринский Э.Б., Шустеф В.Н. Оптимизация режима работы магистрального газопровода по двум критериям // Транспорт и хранение газа. - 1978. - № 7.- С.36-
20. Гарляускас А.И. Оптимизация режимов газотранспортных систем по двум критериям // Транспорт и хранение газа. Реф. сб. ВНИЭГАЗПРОМА. - 1973. - №3.- С.17-21.
21. Загоринский Э.Е. Энергетический метод определения режима работ многоцеховой компрессорной станции // Транспорт, хранение и использование

газа в народном хозяйстве. Экспр. Информ. ВНИИЭГАЗПРОМА. - 1976-№21. - С.3-4.

22. Джигит Г. А. Оптимизация режимов работы компрессорных станций // Газовая промышленность, - № 5. - 1974. - С.22.

23. Оптимизация и безопасность работы компрессорных цехов // Газовая промышленность. - 1998.- № 12. - С.18-20

24. Центробежные нагнетатели для ГПА многониточных газотранспортных систем // Газовая промышленность. - 1998. - № 12. - С.36-38.

25. Никитин. В.И. Использование разнотипных газоперекачивающих агрегатов на КС. // Газовая промышленность - 1993 - № 2.- С.28-30.

26. Никишин В.И., Панкратов В.С., Берман Р.Я. Диалоговая система обработки диспетчерской информации на ЭВМ. // Газовая промышленность. - 1986.- № 11. - С. 38-39.

27. Берман. Р.Я., Бобровский С.А., Галиуллин З.Т. Расчет режимов работы закольцованной системы газопроводов на ЭВМ // Газовая промышленность. – 1966. - №12. – С. 15 – 18.

28. Семимжанов Э.С., Гарляускас А.П. Метод динамического программирования в управлении транспортом газа // Газовая промышленность. - 1966. - №12.

29. Мееров М.В., Ахметаянов А.В., Литвак Б.Я. Оптимальное управление компрессорными станциями магистральных газопроводов // Изв. Вузов. Нефть и газ. - 1969. - №10

30. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. - М.: Наука, 1969.

31. Матевосян П. А., Бабаджанова М. А., Арутян Р. Л. Вычислительное устройство для оперативного оптимального распределения нагрузок между параллельно работающими нагнетателями компрессорной станции. // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реф. сб. – М.: ВНИИЭГАЗПРОМ. – 1974. – Вып. 4. – С. 9 – 12.

32. Мисарек Д. Турбокомпрессоры. - М.: Машиностроение, 1968.

33. Дубинский А.В., Вольвовский Н.В. Агрегированное описание групп электроприводных ГПА в АСУТП транспорта газа. // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный научно-техн. сборник. – М.:ВНИИОЭНГ, 1983. - Вып. 3. - С. 13-14.
34. Олейниченко А.В. Анализ эксплуатации агрегатов ГПА Ц-16 с системой регулирования фирмы "ССС" // Газовая промышленность.-1996 - №5.- С. 7-8.
35. Овсецин И.С., Комягин А.О. Система антипомпажного регулирования центробежных нагнетателей с электроприводом / Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный сборник. - М.: ВНИИЭГАЗПРОМ, 1972. - Вып.7. - с.9-17.
36. Зиновьев Г.М., Юрьев А.Д. Принципы построения системы защиты многоцеховых КС с газотурбинным приводом центробежных нагнетателей от помпажа // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реферативный сборник. -М.: ВНИИОЭНГ, 1981. - Вып.3 - С.1-9.
37. Михайлов Г.А., Готлибович М.И., Зиновьев Г.М. Поддержание безпомпажного режима работы газовой компрессорной станции. // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реф. Науч.-техн. сборник. -М.: ВНИИОЭНГ, 1983.- Вып.1.- С.13-15.
38. Антипомпажная защита и управление многоцеховой компрессорной станцией / Газли / Дроздов. А.П., Грубич Ю.А., Готлибович. М.Н., Стиль Э.М. // Газовая промышленность. Серия: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности. Реф сборник.- М.:ВНИИОЭНГ, 1980.- Вып.6.- С.1-7.
39. Берман Р.Я. Инженерные расчёты сложных газотранспортных систем на ЭЦВМ. // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности (ВНИИЭгазпром). – 1969. - № 4. - С. 15-21.

40. Рудник А.А. Методи підвищення ефективності транспортування газу. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд.техн. наук.- Івано-Франківськ : Факел, 2002.-18с.
41. Коток В. Б., Тевяшев А. Д., Тевяшева О. А. Моделювання оптимальних режимів роботи багатоцехової компресорної станції. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. - № 2 (11). – С. 89 – 96.
42. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 516 с.
43. Створення та впровадження САК ГПА нового покоління на об'єктах ДК "Укртрансгаз". / І. А. Гордієнко, П. Г. Дудко, Г. В. Старовойтов, О. О. Сорокін, Л. Д. Данюк. // Нафтова і газова промисловість. – 2002. - № 5. – С. 49 – 51.
44. Досвід розроблення та впровадження автоматизованих систем керування компресорними станціями на прикладі автоматизації КС "Тарутине". / В. В. Колодяжний, О. В. Петірімов, В. Г. Старовойтов, В. Б. Коток. // Нафтова і газова промисловість. – 2002. - № 5. – С. 52 – 55. .
45. Степанов А.И. Центробежные и осевые компрессоры, воздуходувки и вентиляторы. Теория, конструкции и применение. – М.: Машиздат. – 1960. – 347с.
46. Поршаков Б.П., Халатин В.И. Газотурбинные установки на магистральных газопроводах. - М.: Недра, 1974. - 160 с.
47. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины.- М.-Л.: Машиностроение, 1964.-336 с.
48. Ткаченко И.Е., Трейко Ю.А. Способы изменения производительности электроприводных компрессорных станций. // Реф.инф. ВНИИЭгазпрома. Серия: Транспорт и хранение газа. – 1983. – Вып. 3. – С.22-24.
49. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. /Пер. с англ. – М.: Мир,1989. – 540 с.
50. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості. Част.1 – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 150 с.
51. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. /Пер. с англ.- М.: Мир,1973. – 958 с.

52. Доброхотов В.В. Центробежные нагнетатели природного газа. – М.: Недра, 1972. – 128с.
53. Пістун Є., Матійко Ф. Розробка методики розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу для задач його обліку // Нафта і газ України. Матеріали 6-ої Міжнародної науково-практичної конференції. Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада. Том 3. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. -С.211-213.
54. Математическое моделирование технологических объектов магистральных газопроводов / Н.М. Константинов и др. – М.: Недра, 1988, - 192 с.
55. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Моделювання процесу компримування газу. // Контроль і управління в складних системах (КУСС – 2003). Тези доповідей сьомої міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 8 – 11 жовтня 2003 року. – Вінниця: Універсум, 2003. – С. 130.
56. Централизованный контроль и оптимальное управление на магистральных газопроводах./В. Т. Сергованцев, Б. Л. Кучин, А. И. Гарляускас, Е. Н. Тихомиров. – Л.: Недра, 1973. – 328 с.
57. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Ідентифікація статичного стану нагнітачів природного газу на базі нейромереж. // Нафтова і газова промисловість. – 2003. - № 5. – С. 43 – 46.
58. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Математичне моделювання процесу компримування природного газу. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. - № 3(8). – С. 21 – 26.
59. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Под. ред. Э.К.Лецкого. – М.: Мир., 1977. – 552 с.
60. Круг Г. К., Сосулин Ю. А., Фатуев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. – М.: Наука, 1977. – 208 с.
61. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. /Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
62. Лоусон Ч., Хенсон Н. Численное решение задач метода наименьших квадратов./Пер. с англ. – М.:Наука, 1985. – 232 с.

63. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
64. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 382 с.
65. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Ідентифікація статичних характеристик технологічних об'єктів на базі нейромереж. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. - № 9 (том 2) . – С. 139 -145
66. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Оптимізація технологічного режиму компримування природного газу. // Нафтова і газова промисловість. – 2003. - № 6. – С. 40 – 42.
67. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Оптимізація процесу компримування природного газу. // Автоматика – 2003. Матеріали 10-ої міжнародної конференції з автоматичного управління. м. Севастополь, 15 – 19 вересня 2003: в 3-х томах. – Севастополь: СевНТУ, 2003. – Т. 1. – С. 34 – 35.
68. Александров А.В., Берман Р.Я., Яковлев Е.И. Выбор оптимального режима эксплуатации сложной системы дальнего транспорта газа с применением ЭВМ. М., ВНИИЭгазпром, 1970.
69. Темнель Д.Г., Маслов В.М. Оптимальные параметры технологического процесса транспорта газа для эксплуатирующейся трубопроводной системы. Л., Недра, 1970.
70. Таха Х. Введение в исследование операций. В 2-х книгах./ Пер. с англ. - М.: Мир, 1985.- Кн.1,-479 с.; Кн.2-496 с.
71. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. Т.1.Математические основы кибернетики. Учеб. пособие. - М.:Энергия, 1973.- 504с.
72. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. /Пер. с англ. – М.:Наука, 1969. – 215 с.
73. Фиако А., Мак-Кормик Г.П. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации. – М.: Мир, 1972 – 332 с.

74. Two-phase algorithm for nonlinear constraint problem: Nonlinear Programming 3/0. I. Mangasarian, R. R. Meyer, S. M. Robinson. – London and New York: Academic Press, 1978. – Pp. 97 - 124
75. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Оптимізація роботи компресорних станцій з різнотипними приводами. // Матеріали 7-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Нафта і газ України – 2002". Київ, 31.10. – 1.11.2002 р. – Т.2, С. 261 – 263
76. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Мікропроцесорна система оптимально-го керування компресорними станціями. // Вісник технологічного університету Поділля. – 2003. – Том 1. Технічні науки. – С. 41 – 44.
77. Оптимізація режиму роботи компресорного цеху за допомогою програмно-технічних засобів. / І. А. Гордієнко, П. Г. Дудко, Г. В. Старовойтов, О. О. Сорокін, М. В. Хохряков, С. В. Дістрянов. // Нафтова і газова промисловість. – 2002. - № 6. – С. 52 – 55.
78. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Нейрообчислювачі параметрів нагнітачів природного газу. // Нафтова і газова промисловість. – 2002. - № 5. – С. 39 – 41.
79. Горбійчук М.І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Аналітичні моделі газодинамічних приведених характеристик відцентрових нагнітачів природного газу. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2003. - № 1 (5). – С. 64 – 67.

ДОДАТОК А

ПРИКЛАД СЕРТИФІКАТУ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Переданого по – Союз

Дата відбору проби: 10.07.01

Умови відбору проби: Температура - 24°C; Тиск – 47 кг/см³

Фізико-хімічні показники (ФХП) парам. газу Т 20 °С, тиск 0,1 МПа

Результати аналізу:

Найменування ФХП газу	Фактичні результати аналізу газу, % об'ємний
Метан (C1)	98,304
Етан (C2)	0,561
Пропан (C3)	0,196
ізо-Бутан (iC4)	0,028
н-Бутан (nC4)	0,036
нео-Пентан (неоC4)	0
ізо-Пентан (iC5)	0,005
н-Пентан (nC5)	0,005
Гексан+вищ. (C6+вищ.)	0,000
Кисень (O2)	0,006
Азот (N2)	0,823
Діод вуглецю (CO2)	0,038
Механічні домішки, г/м ³	
Меркаптанова сірка, г/м ³	
Сірководень, г/м ³	
Густина відносна	0,5643
Густина пінометрична, кг/м ³	
Густина хроматографічна, кг/м ³	0,68
Нича теплота згорання, ккал/м ³	7986
Число Воббе (нижче) ккал/м ³	10631
Точка роси при P=3,92 МПа, не вище °С	

ДОДАТОК Б

АНАЛІЗ ЗМІНИ ГУСТИНИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ (Газопровід "Союз")

Позначення

t - час, дні
 ρ - густина газу, кг/куб. м.
 Δ - 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

$z := \text{rows}(g)$ Кількість замірів густини газу

$$i := 0..z - 1$$

$F_{i,0} := 1 \quad F_{i,1} := t_i$ 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 $\rho = f(t)$ до вісі абсцис

$y\rho := F \cdot a$ Розрахункові значення густини газу

Перевірка гіпотези про нульове значення коефіцієнта a_1

$$df := z - 2$$

$\alpha := 0.05$ Рівень довіри

$$s1 := \sqrt{\frac{1}{z-2} \cdot \sum_{j=0}^{z-1} (\rho_j - y\rho_j)^2}$$

Середньоквадратичне відхилення експериментальних даних від розрахункових для густини газу

$$s1 = 6.647 \times 10^{-4}$$

$s_{a1} := (C_{1,1})^{0.5} \cdot s1$ Середньоквадратична відхилення для коефіцієнта a_1

$$s_{a1} = 1.582 \times 10^{-6}$$

$H_0: \mu = \mu_0$ 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

$$t := \frac{(a_1 - \mu_0)}{s_{a1}} \quad t_t = 3.602 \quad \text{Нова нормована випадкова величина}$$

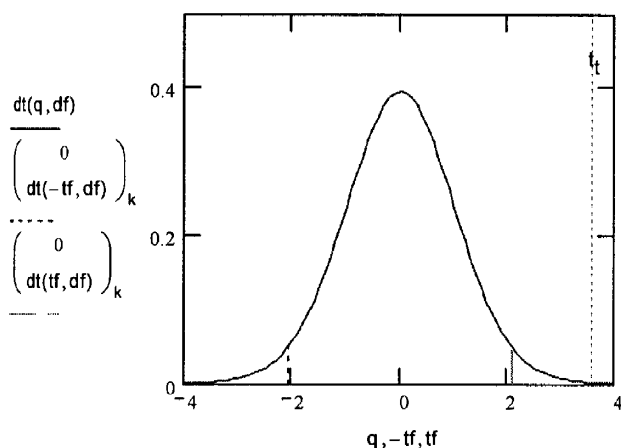
$ff := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, df\right)$ Обчислення інтервалу, в який з ймовірністю $P=1-\alpha$ попаде коефіцієнт a_1

$$ff = 2.06$$

$|a_1| < ff \cdot s_{a1} = 0$ **Умова виконання гіпотези** H_0 : якщо логічна умова "одиниця", то гіпотеза H_0 приймається

Графічна інтерпретація H_0 -гіпотези

$$q := -4, -3.9.. 4 \quad k := 0.. 1$$



Обчислення довірливих інтервалів

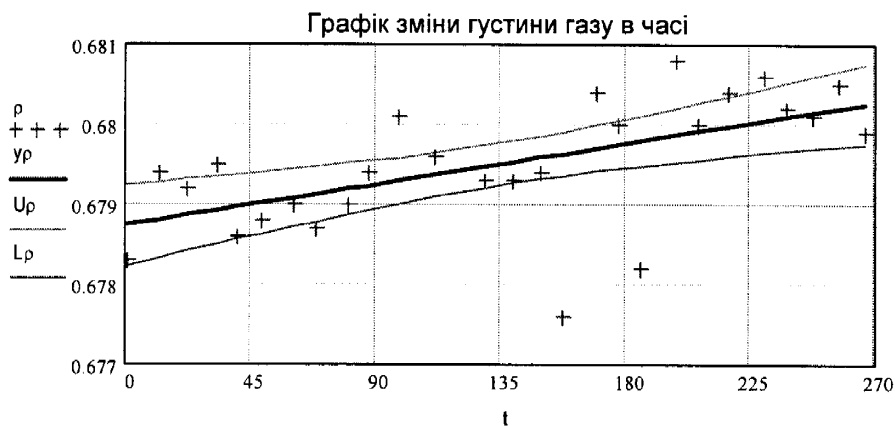
Довірливий інтервал для лінії регресії $\rho=f(t)$

$$t_c := \frac{1}{z} \cdot \sum_{j=0}^{z-1} t_j \quad \text{Середнє значення для величини } t$$

$$s_i := s_1^2 \cdot \left[\frac{1}{z} + \frac{(t_i - t_c)^2}{\sum_{j=0}^{z-1} (t_j - t_c)^2} \right] \quad \text{Дисперсія для лінії регресії}$$

$$U_{\rho_i} := y_{\rho_i} + tf \cdot \sqrt{s_i} \quad \text{Верхня межа довірливого інтервалу}$$

$$L_{\rho_i} := y_{\rho_i} - tf \cdot \sqrt{s_i} \quad \text{Нижня межа довірливого інтервалу}$$



Довірливий інтервал для оцінки математичного очікування випадкової величини ρ

$m := \text{mean}(\rho) \quad m = 0.679$ Оцінка математичного очікування випадкової величини ρ

$s := \text{stdev}(\rho) \cdot \sqrt{\frac{z}{z-1}} \quad s = 8.033 \times 10^{-4}$ Оцінка дисперсії випадкової величини ρ

$(L \ U) := \left(m - \left| \text{qt}\left(\frac{\alpha}{2}, z-1\right) \right| \cdot \frac{s}{\sqrt{z}} \quad m + \left| \text{qt}\left(\frac{\alpha}{2}, z-1\right) \right| \cdot \frac{s}{\sqrt{z}} \right)$ Довірливий інтервал для m

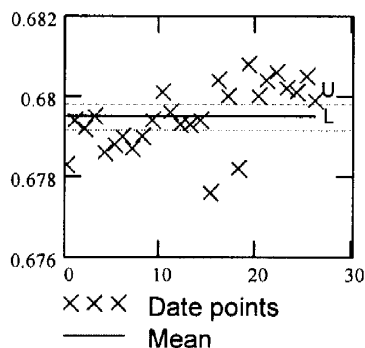
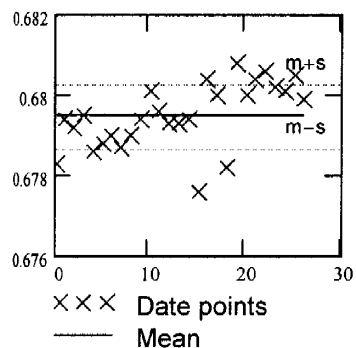
$U = 0.68$ Верхня межа довірливого інтервалу

$L = 0.679$ Нижня межа довірливого інтервалу

$\frac{U-L}{m} \cdot 100 = 0.094$ Відносна ширина довірливого інтервалу, %

Графічна інтерпретація результатів обчислень оцінки математичного очікування випадкової величини ρ

$i := 0..z-1$



Довірливий інтервал для оцінки дисперсії випадкової величини ρ

$N := z - 1$

$L1 := \frac{N \cdot s^2}{\text{qchisq}\left(1 - \frac{\alpha}{2}, N\right)}$ Нижня межа довірливого інтервалу

$L1 = 4.002 \times 10^{-7}$

$$|U1| := \frac{N \cdot s^2}{\text{qchisq}\left(\frac{\alpha}{2}, N\right)} \quad \text{Верхня межа довірливого інтервалу}$$

$$|U1| = 1.212 \times 10^{-6}$$

$$\left| \frac{U1 - L1}{s} \right| \cdot 100 = 0.101 \quad \text{Відносна ширина довірливого інтервалу, \%}$$

Діапазон зміни густини ρ

$$\text{Нижня межа: } U\rho_0 - L\rho_0 = 1.021 \times 10^{-3}$$

$$\text{Верхня межа: } U\rho_{z-1} - L\rho_{z-1} = 1.008 \times 10^{-3}$$

ДОДАТОК В

АНАЛІЗ ФОРМУЛ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА СТИСЛИВОСТІ ГАЗУ

Формула для обчислення коефіцієнта стисливості газу у відповідності з РД 50-213-80

$$\begin{aligned}
 z(P_{\text{nsi}}, T, \rho, X_y, X_a) := & P \leftarrow 10.1972(P_{\text{nsi}} + 0.101325) \\
 & P_{\text{nk}} \leftarrow 30.168 \left[0.05993(26.831 - \rho) + (X_y - 0.392 X_a) \cdot 10^{-2} \right] \\
 & T_{\text{nk}} \leftarrow 88.25 \left[1.7591(0.56364 + \rho) - (X_y + 1.68 X_a) \cdot 10^{-2} \right] \\
 & P_{\text{np}} \leftarrow \frac{P}{P_{\text{nk}}} \\
 & T_{\text{np}} \leftarrow \frac{T}{T_{\text{nk}}} \\
 & P_c \leftarrow 0.6714 P_{\text{np}} \\
 & T_c \leftarrow 0.71892 T_{\text{np}} \\
 & \left(\frac{1.61353}{T_c^2} - 2.21323 \right) \\
 & Q1 \leftarrow \frac{\quad}{T_c} + 3.30378 \\
 & \left(\frac{4.57697}{T_c^2} + 26.5827 \right) \\
 & Q2 \leftarrow \frac{\quad}{T_c - Q1} \\
 & B1 \leftarrow \frac{(300 - Q1 \cdot Q2^2)}{9 \cdot Q1} \\
 & t_c \leftarrow 1.09 - T_c \\
 & t_{c1} \leftarrow -1.09 + T_c \\
 & p_c \leftarrow 1.69 - P_c^2 \\
 & F1 \leftarrow 1 - 75 \cdot 10^{-5} \cdot P_c \cdot [P_c^{1.3} \cdot (2 - \exp(-20 \cdot t_c)) + 1756 t_c^4 \cdot p_c] \\
 & F2 \leftarrow 1 - 10^{-3} \cdot P_c^2 \cdot [0.75 P_c^{0.3} \cdot \exp(-20 \cdot t_{c1}) + 1.1 \cdot t_{c1}^{0.5} \cdot (2.17 + 1.4 t_{c1}^{0.5} - P_c)^2] \\
 & B0 \leftarrow \left[\frac{\left(\frac{450 - Q1 \cdot Q2^2}{27} \cdot Q2 - 50 \cdot P_c \cdot F1 \right)}{Q1} \right] \text{ if } \begin{cases} 0.0147 \leq P_c \leq 1.3 \\ 0.84 \leq T_c < 1.09 \end{cases} \\
 & \left[\frac{\left(\frac{450 - Q1 \cdot Q2^2}{27} \cdot Q2 - 50 \cdot P_c \cdot F2 \right)}{Q1} \right] \text{ if } \begin{cases} 0.0147 \leq P_c \leq 2 \\ 1.09 \leq T_c \leq 1.4 \end{cases} \\
 & B2 \leftarrow \left[(B0^2 + B1^3)^{0.5} + B0 \right]^{\frac{1}{3}} \\
 & \left(1 + \frac{1.32 \cdot 10^{-3}}{T_c^{3.25}} \right)^2 \cdot \frac{P_c}{\frac{B1}{B2} - B2 + \frac{Q2}{3}}
 \end{aligned}$$

$$Z1(p, t, \Delta) := \begin{cases} (-0.457 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta + 0.626 \cdot 10^{-3}) \cdot (p - 6) + 0.982 & \text{if } t < 25 \\ (-0.345 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta + 0.446 \cdot 10^{-3}) \cdot (p - 6) + 0.985 & \text{if } 25 \leq t < 50 \\ (-0.125 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta + 0.461 \cdot 10^{-3}) \cdot (p - 6) + 0.992 & \text{if } t \geq 50 \end{cases}$$

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

$\rho := 0.6793$ Густина газу за повітрям

$\Delta := 0.564$ Відносна густина газу за повітрям

$X_a := 8.26 \cdot 10^{-3}$ Концентрація азоту в газовій суміші

$X_y := 3.317 \cdot 10^{-4}$ Концентрація вуглекислого газу в газовій суміші

$p_0 := 20$ Початкове значення тиску

$p_k := 60$ Кінцеве значення тиску

N := 25 Кількість точок обчислень

$st := \frac{p_k - p_0}{N}$ Крок обчислень

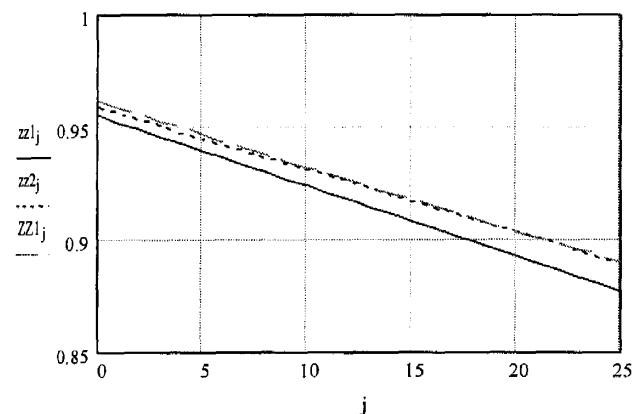
j := 0..N

$p_j := p_0 + st \cdot j$ $p_{xj} := 0.101 \cdot (p_0 + st \cdot j)$

Обчислення коефіцієнта стисливості при t=20

t := 20

$zz1_j := Z1(p_j, t, \Delta)$ $zz2_j := Z2(p_j, t, \Delta)$ $ZZ1_j := Z(p_{xj}, t + 273.15, \rho, X_y, X_a)$



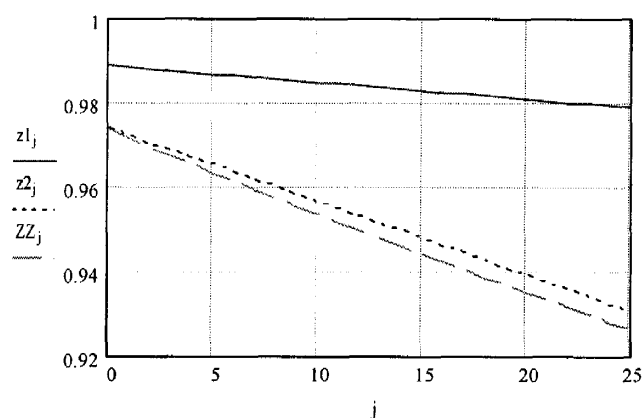
Похибки обчислень

$$\delta := \frac{|\max(zz1 - ZZ1)|}{ZZ1_{25}} \cdot 100 \quad \delta = 0.772 \quad \delta_1 := \frac{|\max(zz2 - ZZ1)|}{ZZ1_{25}} \cdot 100 \quad \delta_1 = 0.057$$

Обчислення коефіцієнта стисливості при $t=50$

$t := 50$

$$z1_j := Z1(pz_j, t, \Delta) \quad z2_j := Z2(pz_j, t, \Delta) \quad ZZ_j := Z(px_j, t + 273.15, \rho, X_y, X_a)$$



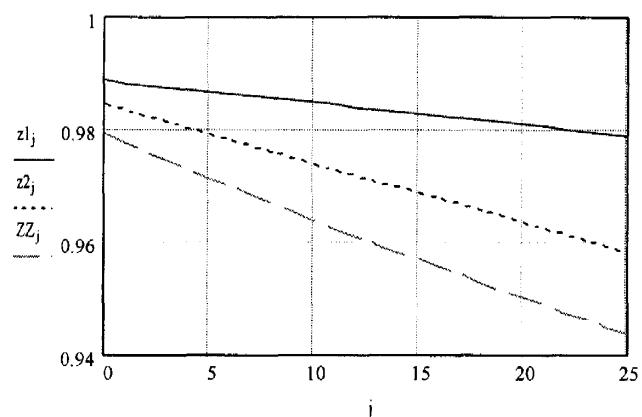
Похибки обчислень

$$\delta := \frac{|\max(z1 - ZZ)|}{ZZ_{25}} \cdot 100 \quad \delta = 5.658 \quad \delta_1 := \frac{|\max(z2 - ZZ)|}{ZZ_{25}} \cdot 100 \quad \delta_1 = 0.454$$

Обчислення коефіцієнта стисливості при $t=70$

$t := 70$

$$z1_j := Z1(pz_j, t, \Delta) \quad z2_j := Z2(pz_j, t, \Delta) \quad ZZ_j := Z(px_j, t + 273.15, \rho, X_y, X_a)$$



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 Г

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИТРАТИ ПАЛИВНОГО ГАЗУ ВІД ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ГПА
(НАГНІТАЧ RF-2ВВ-30 КС - 21 "СОЮЗ")**

Журнал диспетчера

DATA_1:=  DATA C:= 
D:\..\XQA.xls D:\..\XQA1.xls

DATA_C := DATA_1

N := rows(DATA_C) - 1 N = ■ ND := rows(Data_C) - 1 ND = ■

**Обчислення середнього значення числа
обертів вала нагнітача ГПА**

nds - середнє значення числа обертів (по ГПА)

nd1 := DATA_C <5> nd2 := DATA_C <11>
nd3 := DATA_C <17> nd4 := DATA_C <23>
nd5 := DATA_C <29>
nd6 := DATA_C <35>
nd7 := DATA_C <41>

NND1 := augment(nd1, nd2) NND2 := augment(NND1, nd3) NND3 := augment(NND2, nd4)

NND4 := augment(NND3, nd5) NND5 := augment(NND4, nd6)

NND := augment(NND5, nd7) Матриця значень числа обертів вала нагнітача
ГПА

Кількість працюючих ГПА

KDD := $\left\{ \begin{array}{l} K \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{rows}(NND) - 1 \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{for } j \in 0.. \text{cols}(NND) - 1 \\ \quad K \leftarrow K + 1 \text{ if } NND_{i,j} \neq 0 \\ F_i \leftarrow K \\ K \leftarrow 0 \end{array} \right. \\ F \end{array} \right.$

i := 0.. rows(NND) - 1 J_i := i

nns := $\left\{ \begin{array}{l} \text{Sum} \leftarrow 0 \\ K \leftarrow 0 \\ k \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{rows}(NND) - 1 \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{for } j \in 0.. \text{cols}(NND) - 1 \\ \quad \text{if } NND_{i,j} \neq 0 \\ \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Sum} \leftarrow \text{Sum} + NND_{i,j} \\ K \leftarrow K + 1 \end{array} \right. \\ \text{if } KDD_i \neq 0 \\ \quad \quad \left\{ \begin{array}{l} F_i \leftarrow \frac{\text{Sum}}{K} \\ \text{Sum} \leftarrow 0 \\ K \leftarrow 0 \end{array} \right. \\ F_i \leftarrow \text{Sum} \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ F \end{array} \right.$

**Обчислення середнього значення тиску
газу на вході і на виході нагнітача ГПА**

PIND1:= DATA_C <0> PIND2:= DATA_C <6> PIND3:= DATA_C <12>
PIND4:= DATA_C <18>

PIND5:= DATA_C <24> PIND6:= DATA_C <30>
PIND7:= DATA_C <36>

PND1 := augment(PIND1,PIND2) PND2 := augment(PND1,PIND3) PND3 := augment(PND2,PIND4)

PND4 := augment(PND3,PIND5) PND5 := augment(PND4,PIND6)

PND := augment(PND5,PIND7) Матриця значень тиску газу на вході в нагнітач
ГПА

POPD1:= DATA_C <1> POPD2:= DATA_C <7> POPD3:= DATA_C <13>
POPD4:= DATA_C <19>

POPD5:= DATA_C <25> POPD6:= DATA_C <31>
POPD7:= DATA_C <37>

PPD1 := augment(POPD1,POPD2) PPD2 := augment(PPD1,POPD3) PPD3 := augment(PPD2,POPD4)

PPD4 := augment(PPD3,POPD5) PPD5 := augment(PPD4,POPD6)

PPD := augment(PPD5,POPD7) Матриця значень тиску газу на вході в нагнітач
ГПА

pinds - тиск на вході в нагнітач
pops - тиск на виході нагнітача

```
pins :=
Sum ← 0
K ← 0
k ← 0
for i ∈ 0..rows(PIND) - 1
  for j ∈ 0..cols(PIND) - 1
    if PINDi,j ≠ 0
      Sum ← Sum + PINDi,j
      K ← K + 1
    if KDDi ≠ 0
      Fi ←  $\frac{\text{Sum}}{K}$ 
      Sum ← 0
      K ← 0
    Fi ← Sum otherwise
F
```

```
pops :=
Sum ← 0
K ← 0
k ← 0
for i ∈ 0..rows(POPD) - 1
  for j ∈ 0..cols(POPD) - 1
    if POPDi,j ≠ 0
      Sum ← Sum + POPDi,j
      K ← K + 1
    if KDDi ≠ 0
      Fi ←  $\frac{\text{Sum}}{K}$ 
      Sum ← 0
      K ← 0
    Fi ← Sum otherwise
F
```

Температура газу на вході і на виході нагнітача

```

TIND1 := Data_C <6>    TIND2 := Data_C <16>
                        TIND3 := Data_C <26>    TIND4 := Data_C <36>
TIND5 := Data_C <46>    TIND6 := Data_C <56>
                        TIND7 := Data_C <66>

TD1 := augment(TIND1, TIND2)    TD2 := augment(TD1, TIND3)    TD3 := augment(TD2, TIND4)
TD4 := augment(TD3, TIND5)    TD5 := augment(TD4, TIND6)    TIND := augment(TD5, TIND7)

TOPD1 := Data_C <7>
        TOPD2 := Data_C <17>
TOPD5 := Data_C <47>
        TOPD6 := Data_C <57>
TOPD3 := Data_C <27>
        TOPD4 := Data_C <37>
TOPD7 := Data_C <67>

KTD := | K ← 0
        | for i ∈ 0.. rows(TIND) - 1
        |   | for j ∈ 0.. cols(TIND) - 1
        |   |   | K ← K + 1 if TINDi,j ≠ 0
        |   |   | Fi ← K
        |   |   | K ← 0
        |   | F
        | F

TPD1 := augment(TOPD1, TOPD2)    TPD2 := augment(TPD1, TOPD3)    TPD3 := augment(TPD2, TOPD4)
TPD4 := augment(TPD3, TOPD5)    TPD5 := augment(TPD4, TOPD6)    TOPD := augment(TPD5, TOPD7)

bins := | Sum ← 0
        | K ← 0
        | k ← 0
        | for i ∈ 0.. rows(TIND) - 1
        |   | for j ∈ 0.. cols(TIND) - 1
        |   |   | if TINDi,j ≠ 0
        |   |   |   | Sum ← Sum + TINDi,j
        |   |   |   | K ← K + 1
        |   |   | if KDDi ≠ 0
        |   |   |   | Fi ←  $\frac{\text{Sum}}{K}$ 
        |   |   |   | Sum ← 0
        |   |   |   | K ← 0
        |   |   | Fi ← Sum otherwise
        |   | F
        | F

tops := | Sum ← 0
        | K ← 0
        | k ← 0
        | for i ∈ 0.. rows(TOPD) - 1
        |   | for j ∈ 0.. cols(TOPD) - 1
        |   |   | if TOPDi,j ≠ 0
        |   |   |   | Sum ← Sum + TOPDi,j
        |   |   |   | K ← K + 1
        |   |   | if KDDi ≠ 0
        |   |   |   | Fi ←  $\frac{\text{Sum}}{K}$ 
        |   |   |   | Sum ← 0
        |   |   |   | K ← 0
        |   |   | Fi ← Sum otherwise
        |   | F
        | F

```

ВІТРАТА ПАЛИВНОГО ГАЗУ

```

Q := DATA_C <45>
pgs := | j ← 0
      | for i ∈ 0..rows(Q) - 1
      |   | Fj ← Qi if Qi ≠ 0
      |   | j ← j + 1 if Qi ≠ 0
      | F
    
```

ВІСКИ ПАЛИВНОГО ГАЗУ

```

PGD1 := Data_C <9>   PGD2 := Data_C <19>   PGD5 := Data_C <49>
                                           PGD6 := Data_C <59>
PGD3 := Data_C <29>   PGD4 := Data_C <39>
                                           PGD7 := Data_C <69>
PD1 := augment(PGD1, PGD2)  PD2 := augment(PD1, PGD3)  PD3 := augment(PD2, PGD4)
PD4 := augment(PD3, PGD5)  PD5 := augment(PD4, PGD6)  PGD := augment(PD5, PGD7)
    
```

```

pgs := | Sum ← 0
      | K ← 0
      | k ← 0
      | for i ∈ 0..rows(PGD) - 1
      |   | for j ∈ 0..cols(PGD) - 1
      |   |   | if PGDi,j ≠ 0
      |   |   |   | Sum ← Sum + PGDi,j
      |   |   |   | K ← K + 1
      |   |   | if KDDi ≠ 0
      |   |   |   | Fi ←  $\frac{Sum}{K}$ 
      |   |   |   | Sum ← 0
      |   |   |   | K ← 0
      |   |   |   | Fi ← Sum otherwise
      | F
    
```

Продуктивність нагнітача

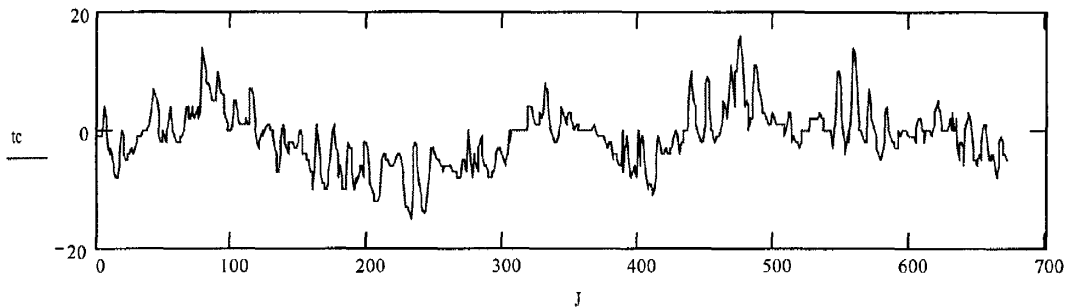
```

q := DATA_C <43>
QV := | for i ∈ 0..rows(q) - 1
      |   | Si ←  $\frac{q_i}{KDD_i}$  if KDDi ≠ 0
      |   | Si ← qi otherwise
      | S
    
```

Температура навколишнього повітря

```

tc := DATA_C <42>
    
```



Подобове усереднення змінних

Змінні

NX - число обертів вала нагнітача

PINS - тиск на вході в нагнітач

TINS - температура газу при вході в нагнітач ГПА

PGS - тиск паливного газу

QS - витрата паливного газу

TW - температура навколишнього середовища

```

KX :=
  K ← 0
  k ← 0
  nn1 ← 11
  while k ≤  $\frac{\text{rows}(nns) + 1}{12} - 1$ 
    for i ∈ nn1 - 11..nn1
      K ← K + 1 if nnsi ≠ 0
    KZk ← K
    k ← k + 1
    K ← 0
    nn1 ← nn1 + 12
  KZ

```

```

NCX :=
  k ← 0
  nn1 ← 11
  Sum ← 0
  K ← 0
  while k ≤  $\frac{\text{rows}(nns) + 1}{12} - 1$ 
    for i ∈ nn1 - 11..nn1
      Sum ← Sum + nnsi
    Yk ←  $\frac{\text{Sum}}{KX_k}$ 
    Sum ← 0
    k ← k + 1
    nn1 ← nn1 + 12
  Y

```

```

NX :=
  k ← 0
  for i ∈ 0..rows(NCX) - 1
    if NCXi ≠ 0
      Fk ← NCXi
      k ← k + 1
  F

```

Середнє число працюючих агрегатів на КС

```

KK :=
  K1 ← 0
  k ← 0
  nn1 ← 11
  while k ≤  $\frac{\text{rows}(KDD) + 1}{12} - 1$ 
    for i ∈ nn1 - 11..nn1
      K1 ← K1 + 1 if KDDi ≠ 0
    KZk ← K1
    k ← k + 1
    K1 ← 0
    nn1 ← nn1 + 12
  KZ

```

```

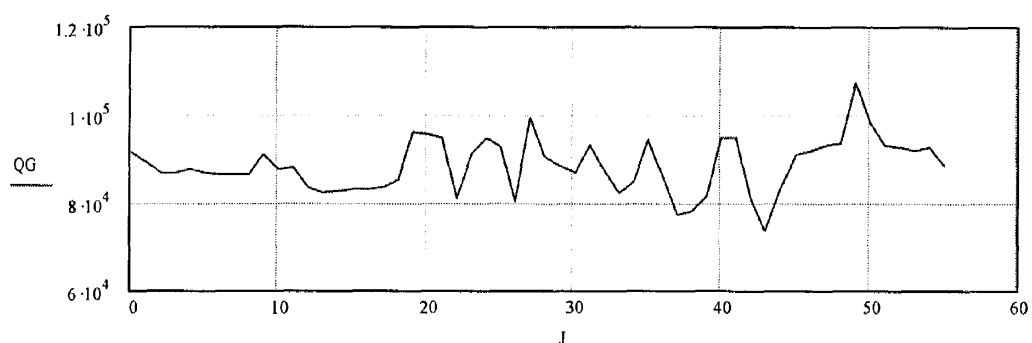
KS :=
  k ← 0
  nn1 ← 11
  Sum ← 0
  while k ≤  $\frac{\text{rows}(KDD) + 1}{12} - 1$ 
    for i ∈ nn1 - 11..nn1
      Sum ← Sum + KDDi
    Yk ←  $\frac{\text{Sum}}{KK_k}$ 
    Sum ← 0
    k ← k + 1
    nn1 ← nn1 + 12
  Y

```

```

QG :=
  k ← 0
  for i ∈ 0..rows(qw) - 1
    if KSi ≠ 0
      Fk ←  $\frac{qw_i}{KS_i}$ 
      k ← k + 1
  F

```



Риск на виході нагнітача

```

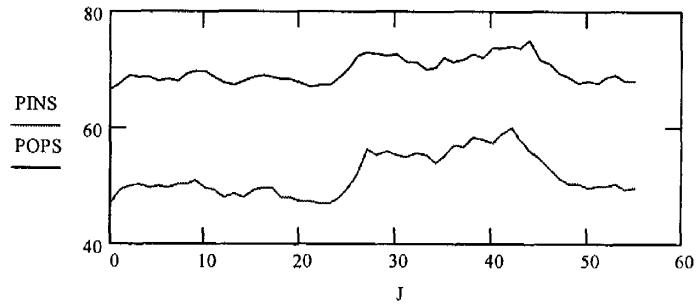
POPC:= | k ← 0
        nn1 ← 11
        Sum ← 0
        K ← 0
        while k ≤  $\frac{\text{rows}(\text{pops}) + 1}{12} - 1$ 
            for i ∈ nn1 - 11..nn1
                Sum ← Sum + popsi
            Yk ←  $\frac{\text{Sum}}{\text{KS1}_k}$ 
            Sum ← 0
            k ← k + 1
            nn1 ← nn1 + 12
        Y

```

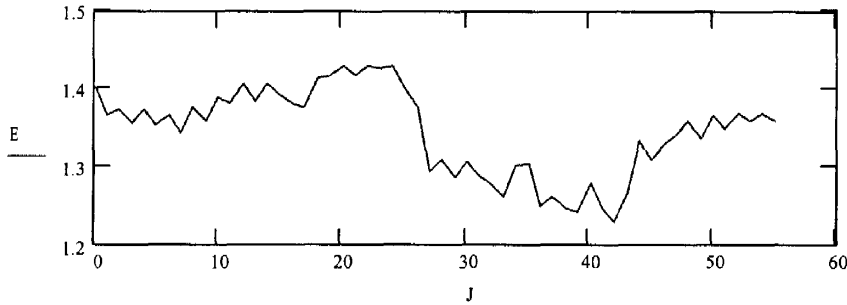
```

POPS:= | k ← 0
        for i ∈ 0..rows(POPC) - 1
            if POPCi ≠ 0
                Fk ← POPCi
                k ← k + 1
        F

```



Степінь стискування газу

$$E_{is} := 0.. \text{rows}(\text{PINS}) - 1 \quad E_{is} := \frac{0.101 \cdot \text{POPS}_{is} + 0.101325}{0.101 \cdot \text{PINS}_{is} + 0.101325}$$


Температура газу на вході в нагнітач

```

KT:= | K ← 0
      k ← 0
      nn1 ← 1
      while k ≤  $\frac{\text{rows}(\text{tins}) + 1}{2} - 1$ 
          for i ∈ nn1 - 1..nn1
              K ← K + 1 if tinsi ≠ 0
          KZk ← K
          k ← k + 1
          K ← 0
          nn1 ← nn1 + 2
      KZ

```

```

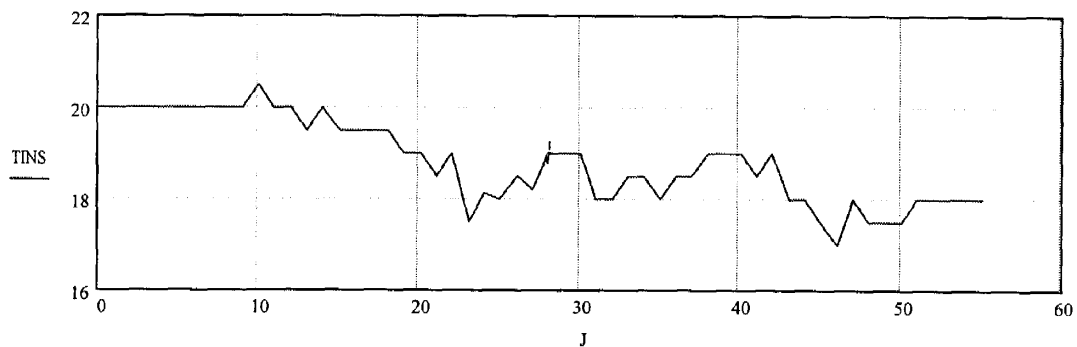
TINC:= | k ← 0
        nn1 ← 1
        Sum ← 0
        while k ≤  $\frac{\text{rows}(\text{tins}) + 1}{2} - 1$ 
            for i ∈ nn1 - 1..nn1
                Sum ← Sum + tinsi
            Yk ←  $\frac{\text{Sum}}{\text{KT}_k}$ 
            Sum ← 0
            k ← k + 1
            nn1 ← nn1 + 2
        Y

```

```

TINS:= | k ← 0
        for i ∈ 0..rows(TINC) - 1
            if TINCi ≠ 0
                Fk ← TINCi
                k ← k + 1
        F

```



Тиск паливного газу

```

PGC:= | k ← 0
      | nn1 ← 1
      | Sum ← 0
      | while k ≤  $\frac{\text{rows}(\text{pgs}) + 1}{2} - 1$ 
      |   | for i ∈ nn1 - 1..nn1
      |   |   Sum ← Sum + pgsi
      |   |   Yk ←  $\frac{\text{Sum}}{KT_k}$ 
      |   |   Sum ← 0
      |   |   k ← k + 1
      |   |   nn1 ← nn1 + 2
      | Y

```

Температура навколишнього середовища

```

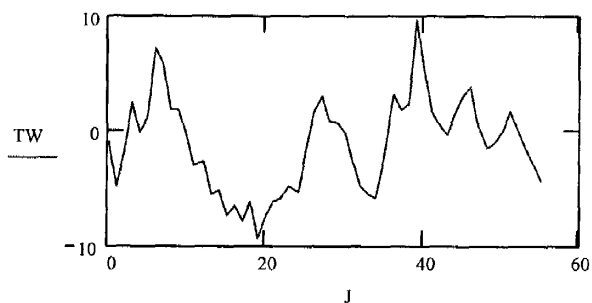
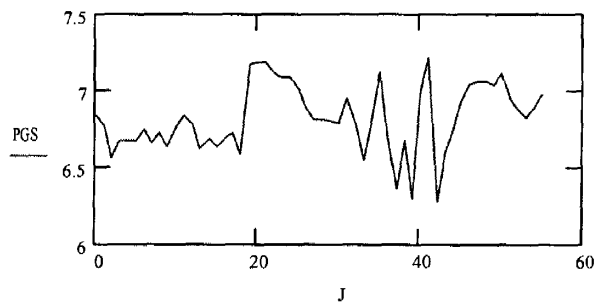
TC := | k ← 0
      | nn1 ← 11
      | Sum ← 0
      | while k ≤  $\frac{\text{rows}(\text{tc}) + 1}{12} - 1$ 
      |   | for i ∈ nn1 - 11..nn1
      |   |   Sum ← Sum + tci
      |   |   Yk ←  $\frac{\text{Sum}}{12}$ 
      |   |   Sum ← 0
      |   |   k ← k + 1
      |   |   nn1 ← nn1 + 12
      | Y

```

```

PGS:= | k ← 0
      | for i ∈ 0..rows(PGC) - 1
      |   | if PGCi ≠ 0
      |   |   | Fk ← PGCi
      |   |   | k ← k + 1
      |   | F
      | TW := | k ← 0
      |   | for i ∈ 0..rows(PGC) - 1
      |   |   | if PGCi ≠ 0
      |   |   |   | Fk ← TCi
      |   |   |   | k ← k + 1
      |   |   | F

```



Продуктивність нагнітача

```

Q :=
  K ← 0
  k ← 0
  nn1 ← 11
  while k ≤  $\frac{\text{rows}(QV) + 1}{12} - 1$ 
    for i ∈ nn1 - 11..nn1
      K ← K + 1 if QVi ≠ 0
    KZk ← K
    k ← k + 1
    K ← 0
    nn1 ← nn1 + 12
  KZ

```

```

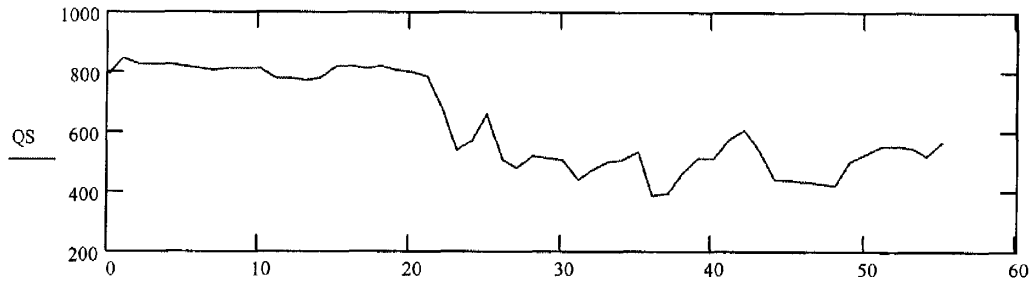
QC :=
  k ← 0
  nn1 ← 11
  Sum ← 0
  K ← 0
  while k ≤  $\frac{\text{rows}(QV) + 1}{12} - 1$ 
    for i ∈ nn1 - 11..nn1
      Sum ← Sum + QVi
    Yk ←  $\frac{\text{Sum}}{KQ_k}$ 
    Sum ← 0
    k ← k + 1
    nn1 ← nn1 + 12
  Y

```

```

QS :=
  k ← 0
  for i ∈ 0..rows(QC) - 1
    if PGCi ≠ 0
      Fk ← QCi
      k ← k + 1
  F

```



Обчислення коефіцієнта стисливості природного газу

$$\begin{aligned}
 f(t, P_n, \rho_c, r_a, r_b, r_m) := & \begin{cases} T \leftarrow t + 273.5 \\ T_n \leftarrow T \\ P_{aa} \leftarrow 0.101 + P_n \\ P \leftarrow 10.1972 \cdot P_{aa} \\ X_b \leftarrow \frac{r_b}{0.9947 \cdot \left(\frac{r_a}{0.9997} + \frac{r_b}{0.9947} + \frac{r_m}{0.9981} \right)} \\ X_a \leftarrow \frac{r_a}{0.9947 \cdot \left(\frac{r_a}{0.9997} + \frac{r_b}{0.9947} + \frac{r_m}{0.9981} \right)} \\ X_m \leftarrow 1 - X_a - X_b \\ P_{nk} \leftarrow 2.9585 \cdot (1.608 - 0.05994 \cdot \rho_c + X_b - 0.392 \cdot X_a) \\ T_{nk} \leftarrow 88.25 \cdot (0.9915 + 1.759 \cdot \rho_c - X_b - 1.681 \cdot X_a) \\ P_a \leftarrow 0.6714 \cdot \left(\frac{P_{aa}}{P_{nk}} \right) + 0.0147 \\ T_a \leftarrow 0.71892 \cdot \left(\frac{T}{T_{nk}} \right) + 0.0007 \\ \Delta T_a \leftarrow T_a - 1.09 \\ F \leftarrow \begin{cases} f \leftarrow \frac{75 \cdot 10^{-5} \cdot P_a^{2.3}}{e^{20 \cdot \Delta T_a}} + 11 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T_a^{0.5} \cdot [P_a \cdot (2.17 - P_a + 1.4 \cdot \Delta T_a^{0.5})]^2 & \text{if } \begin{cases} 0 \leq P_a \leq 2 \\ 0 \leq \Delta T_a \leq 0.3 \end{cases} \\ f \leftarrow 75 \cdot 10^{-5} \cdot P_a^{2.3} \cdot (2 - e^{20 \cdot \Delta T_a}) + 1.317 \cdot P_a \cdot (1.69 - P_a^2) \cdot \Delta T_a^4 & \text{if } \begin{cases} 0 \leq P_a < 1.3 \\ -0.25 \leq \Delta T_a < 0 \end{cases} \\ \text{if } \begin{cases} 1.3 \leq P_a < 2 \\ -0.25 \leq \Delta T_a < 0 \end{cases} \\ \quad \left[\begin{aligned} d & \leftarrow [\Delta T_a \cdot (0.03249 + 18.028 \cdot \Delta T_a^2) + \Delta T_a^2 \cdot [2.0167 + \Delta T_a^2 \cdot (42.844 + 200 \cdot \Delta T_a^2)]] \\ f & \leftarrow 75 \cdot 10^{-5} \cdot P_a^{2.3} \cdot (2 - e^{20 \cdot \Delta T_a}) + 0.455 \cdot (1.3 - P_a) \cdot (1.69 \cdot 2^{1.25} - P_a^2) \cdot d \end{aligned} \right] \end{cases} \\ \theta_1 \leftarrow \frac{T_a^5}{T_a^2 \cdot (6.60756 \cdot T_a - 4.4264\theta + 3.22706)} \\ \theta_0 \leftarrow [T_a^2 \cdot (1.77218 - 0.8879 \cdot T_a) + 0.30513] \cdot \frac{\theta_1}{T_a^4} \\ B_0 \leftarrow \theta_0 \cdot (\theta_1 - \theta_0^2) + .1 \cdot \theta_1 \cdot P_a \cdot (F - 1) \\ B_1 \leftarrow -\theta_0^2 + 2 \cdot \frac{\theta_1}{3} \\ B_2 \leftarrow (B_0 + \sqrt{B_0^2 + B_1^3})^{\frac{1}{3}} \\ \left(1 + \frac{0.00132}{T_a^{3.25}} \right)^2 \cdot \frac{P_a}{10} \\ \frac{B_1}{B_2} - B_2 + \theta_0 \end{cases}
 \end{aligned}
 \end{aligned}$$

Прийняті позначення

P_n - тиск газу (надлишковий), МПа

T - температура газу, К

ρ_c - густина газу при стандартних умовах
($P_c=0.101325$ МПа, $T_c=293,15$ К), кг/куб. м

m - об'ємна доля метану в газовій суміші за стандартних умов

ra - об'ємна доля азоту в газовій суміші за стандартних умов

ru - об'ємна доля двоокису вуглецю в газовій суміші за стандартних умов

ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАЗУ

$$\rho_c := 0.6799 \quad ra := 0.00792 \quad rb := 0.004 \quad rm := 0.98449$$

$$n := \text{rows}(\text{TINS}) - 1 \quad iz := 0..n \quad tn_0 := 22$$

$$z_{iz} := Z(\text{TINS}_{iz}, 0.101 \cdot \text{PINS}_{iz}, \rho_c, ra, rb, rm) \quad \text{Коефіцієнт стисливості газу}$$

$$T_n := tn_0 + 273.15 \quad \text{Номінальне значення температури}$$

Модель для витрат, що приведені до робочих умов

$$R_{iz} := z_{iz} \cdot QS_{iz} \cdot \frac{\text{TINS}_{iz} + 273.15}{T_n} \cdot \frac{0.101325}{0.101 \cdot \text{PINS}_{iz}} \cdot \frac{50}{3} \quad YT_N := \frac{QG}{24 \cdot 60}$$

$$qR_{iz} := z_{iz} \cdot QG_{iz} \cdot \frac{\text{TINS}_{iz} + 273.15}{T_n} \cdot \frac{0.101325}{0.101 \cdot \text{PGS}_{iz}} \cdot \frac{1}{24 \cdot 60}$$

$$XZ1 := \text{augment}(\text{TINS}, NX) \quad XY1 := \text{augment}(XZ1, E) \quad kr := 2$$

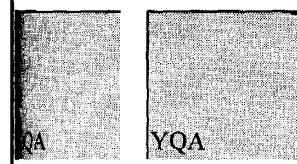
$$XY0 := \text{augment}(XY1, PINS) \quad XY2 := \text{augment}(XY0, TW)$$

$$rs1 := \text{regress}(XY2, qR, kr)$$

$$XQA := XY2$$

$$YQA := YT_N$$

Пересилка сформованих файлів XQA.mat і YQA.mat в Matlab



ДОДАТОК Д

SCRIPT -МНК-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (ПРИКЛАД
– ВИТРАТА ПАЛИВНОГО ГАЗУ)

```

%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_orto1(m);
            P=[Q1 Q2];
        end
    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('коеф. 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;
```

Д1. МНК-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (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
end
Z(1,:)=[];
```

**Д2. МНК-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (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
    end
    if z==0
        break
    end
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);
```

**ДЗ. МНК-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (М-ФАЙЛ:
fun_orto1.m)**

```

function X=fun_orto1(n)
nf=4;f=1;q=4;
while f<=nf
    switch f
    case 1
        qq=[1 1 1 1 1];rf=1;
    case 2
        qq=[1 1 2 3 4];
        rf=3;
    case 3
        qq=[1 3 4 5 0];
        rf=2;
    case 4
        qq=[2 2 2 2 2];
        rf=1;
    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
    end
    if z==0
        break
    end
end

```



```
    end
end
end
switch f
case 1
    P1=U;
case 2
    P2=U;
case 3
    P3=U;
case 4
    P4=U;
end
f=f+1;
end
X2=[P1 P2 P3 P4];
X3=4*eye(n);
X=[X2 X3];
[z1,z2]=size(X);
```

**Д4. МНК-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (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
    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;
        [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

```

**Д5. МНК-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (М-ФАЙЛ:
mnk_pr.m)**

```
function pr=mnk_pr(X,P,j,p,m)
pr=1;
for i=1:m
    if P(i,p)==0
        continue
    end
    pr=pr*X(j,i)^P(i,p);
end
```

ДОДАТОК Ж

SCRIPT -ОРТО-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА
(ПРИКЛАД – ПРОДУКТИВНІСТЬ НАГНІТАЧА)

```

%Продуктивність нагнітача
load XQA.mat;load YQA.mat;
X=XQA;Y=YQA;jf=0;ind=0;
NN=1;ort=0;ind1=0;km=0;
[NS,N]=size(X);qj=2;
%Q-макс.степінь полінома (Q<=4)
Q=3;
disp('Фіксоване число поліном.?');
fix=input('1-yes;0-now');
%Задайте макс. кількість поліномів kmax, що буде включено в модель
if fix==1
    disp('Макс.число поліномів');
kmax=input('kmax=');
end
%Кількість поліномів
Z=fun_kp(N,qj,Q);
K=Z(N,Q+1);
    if Q<=2
Q=fun_ort(N,K);
else
    if Q==3
        Q=fun_orto(N);
else
        Q1=fun_orto(N);
        Q2=fun_orto1(N);
        Q=[Q1 Q2];
end
end
% Основна програма
if fix==1
if kmax>K
    kmax=K
end
end
KL=K;
Q0=zeros(N,KL);A=zeros(KL,KL);
KS=KL;KM=1;JH=1;ZZ=KL;k1=K;
    % Початок циклу за j
    for j=JH:KL
        VM=0;
% Початок циклу за ip
        for ip=1:KS
            SU=ip;
% Початок циклу за i
            for i=1:KM
                if i==j
                    if j==1

```

```

    FS=fun_fs(X,Q,N,NS,SU);
    A(i,j)=FS;
    if A(i,j)==0
        ort=1;
        disp ('Орт_неможлива');
        break
    else
        continue
    end
else
    FS=fun_fs(X,Q,N,NS,SU);
    FSS=0;
    for wi=1:i-1
        FSS=FSS+A(wi,wi)*A(wi,j)^2;
    end
    A(i,j)=FS-FSS;
    if A(i,j)==0
        ort=1;
        disp ('Орт_неможлива');
        break
    else
        continue
    end
end
else
    SZ=i;
    if i<j
        sf=0;
    for in=1:NS
        jb=in;
        pr=fun_pr(X,Q,N,SU,jb);
        pr1=fun_pr1(X,Q0,N,SZ,jb);
        sf=sf+pr*pr1;
    end
    if i==1
        A(i,j)=sf/A(i,i);
    continue
    else
        AR=0;
    for LI=1:i-1
        AR=AR+A(LI,LI)*A(LI,i)*A(LI,j);
    end
    A(i,j)=(sf-AR)/A(i,i);
    continue
end
end
else
    continue
end
end
end
% Кінець циклу i
end
if ort==1

```

```

break
end
ii=j;
    FY=0;
    for in=1:NS
        jb=in;pr=fun_pr(X,Q,N,SU,jb);
        FY=FY+pr*Y(in);
    end
    if ii==1
        B(ii)=FY/A(ii,ii);
        V=A(ii,ii)*B(ii)^2;
    else
        BS=0;
        for jz=1:ii-1
            BS=BS+B(jz)*A(jz,jz)*A(jz,ii);
        end
        B(ii)=(FY-BS)/A(ii,ii);
        V=A(ii,ii)*B(ii)^2;
    end
    if V<=VM
        continue
    else
        VM=V;IV=ip;BB=B(ii);
        for id=1:KM
            AA(id)=A(id,ii);
        end
    end
    end
    % Кінець циклу ip
end
if ort==1
    break
end
    B(j)=BB;
    for i=1:KM
        A(i,j)=AA(i);
    end
    if j==1
        S=sum(Y.^2);
        disp('Поч_сума S=');disp(S);
        S=S-VM;FJ=NS-j;SJ=S/FJ;FI=VM/SJ;
        for i0=1:N
            Q0(i0,j)=Q(i0,IV);
        end
        for j0=IV:KS-1
            for i0=1:N
                Q(i0,j0)=Q(i0,j0+1);
            end
        end
        end
        KM=KM+1;KS=KS-1;
        disp('Етап_закінч. j=');disp(j);
    else
        S=S-VM;FJ=NS-j;SJ=S/FJ;FI=VM/SJ;

```

```

    for i0=1:N
        Q0(i0,j)=Q(i0,IV);
    end
    for j0=IV:KS-1
        for i0=1:N
            Q(i0,j0)=Q(i0,j0+1);
        end
    end
    KM=KM+1;KS=KS-1;
    disp ('Етап_закінч. j=');disp(j);
end
Fkp=finv(0.99,1,FJ);
km=km+1;
if FI>0.024*Fkp
    disp ('Дефект моделі S=');disp(S);
    disp ('Залишкова сума VM=');disp(VM);
    jf=jf+1;
    if jf>=1000
        disp('Подальше підв.точності неможл. ');
        ind=1;
        break
    end
    continue
else
if fix==1
    if km<=kmax
        disp ('Дефект моделі S=');disp(S);
        disp ('Залишкова сума VM=');disp(VM);
        continue
    else
        disp ('Дефект моделі S=');disp(S);
        disp ('Залишкова сума VM=');disp(VM);
        break
    end
end
break
end
end
% Кінець циклу j
end
if ind==1
    break
end
if ort==1
    break
end
qq=Q0;
[nj,mj]=size(qq);
ss=mj-km;
if ss>=0
    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 jb=1:NS
  YR0=0;
  for sz=1:km
    pr1=fun_pr1(X,Q0,N,sz,jb);
    YR0=YR0+pr1*AZ(sz);
  end
  YR(jb)=YR0;
  SX=SX+(Y(jb)-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('Koeff. kop. k=');
disp(m_or);
subplot(2,2,3),plot(xx,y2)
```

**Ж1 ORTO-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (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
```

**Ж2 ОРТО-ПРОГРАМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАТИКИ НАГНІТАЧА (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 3

ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ
БАГАТОЦЕХОВИХ КС (SCRIPT - ФАЙЛ)

```

%Задача оптимізації
%Задайте в такому пор-ку КС-39"УПУ",КС-21"СОЮЗ"
%Продуктив.КС
Q_max=54160;
%К_ть прац.компресорів
N1=1;N2=2;
%Темпер.газу на вході в нагнітач
Tvg=20;
%Степінь стис.газу
E=1.35;
%Тиск на вх.нагнітача
Pvg=49;
%Темпер.навколишнього середовища
Tc=-6;
%Атмосферний тиск, мм.рт.ст.
PPa=733;
global zet;
global zet1;
zet=[Tvg E Pvg Tc, PPa];
zet1=[Q_max N1 N2];
%Початкові обмеж.обертів нагнітача
nn1_min=80;nn2_min=80;
%Задайте обмеж.(темп.газу)
t1_max=54;t2_max=51;
[ntx1_max,ntx2_max,ntx1_min,ntx2_min]=fun_ogr(t1_max,t2_max,nn1_min,nn2_min,zet);
%Задайте обмеж.(темп.вихлоп.газів)
tv1_max=495;tv2_max=460;
[ngx1_max,ngx2_max,ngx1_min,ngx2_min]=fun_ogr1(tv1_max,tv2_max,nn1_min,nn2_min,zet);
nx1_min=max([ntx1_min,ngx1_min]);
nx2_min=max([ntx2_min,ngx2_min]);
nx1_max=min([ntx1_max,ngx1_max]);
nx2_max=min([ntx2_max,ngx2_max]);
%Програма оптимізації
x0=[90,90];
if x0(1)<nx1_min
    x0(1)=nx1_min+0.5;
elseif x0(2)<nx2_min
    x0(2)=nx2_min+0.5;
end
options=optimset('LargeScale','off');
f=[nx1_min,nx2_min];ub=[nx1_max,nx2_max];
[Gval,exitflag]=fmincon(@fun_G,x0,[],[],[],[],lb,ub,@fun_ceq,options,zet,zet1);

```

**31 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (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);z2=x(2);
R1=fun_R1(z1,aG,QG,zet);
R2=fun_R2(z2,aQA,QA0,zet);
G=zet1(2)*R1+zet1(3)*R2;
```

**32 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛ: fun_ceq.m)**

```
function [c,ceq]=fun_ceq(x,zet,zet1)
tz1=x(1);tz2=x(2);
load QG1.mat;load aG1.mat;
load QQN.mat;load aQN.mat;
R1=fun_R1(tz1,aG1,QG1,zet);
R2=fun_R2(tz2,aQN,QQN,zet);
ceq=zet1(2)*R1+zet1(3)*R2-zet1(1);
c=[];
```

**33 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ (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
```

**34 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛ: fun_org.m)**

```

function [nx1_max,nx2_max,nx1_min,nx2_min]=fun_ogr(t1_max,t2_max,nn1_min,nn2_min,zet)
load QTW;load aTW;
load QT0;load aTA;
q1=QTW;a1=aTW;
q2=QT0;a2=aTA;
QQ1=max(max(q1));
QQ2=max(max(q2));
Q=max([QQ1 QQ2]);
for i=1:Q+1
    switch i-1
        case 0
            at0=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa0=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
        case 1
            at1=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa1=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
        case 2
            at2=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa2=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
        case 3
            at3=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa3=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
    end
end
c1=[at3 at2 at1 at0-t1_max];
c2=[aa3 aa2 aa1 aa0-t2_max];
[n1_max,n1_min]=fun_r(c1,nn1_min);
[n2_max,n2_min]=fun_r(c2,nn2_min);
nx1_max=min([100 n1_max]);
nx2_max=min([100 n2_max]);
nx1_min=n1_min;nx2_min=n2_min;

```


**35 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (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
```

```
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
```

**36 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛ: fun_org1.m)**

```

function
[nx1_max,nx2_max,nx1_min,nx2_min]=fun_ogr1(t1_max,t2_max,nn1_min,nn2_min,zet)
load QGG1;load aGG1;
load QTT1;load aTT1;
q1=QGG1;a1=aGG1;
q2=QTT1;a2=aTT1;
QQ1=max(max(q1));
QQ2=max(max(q2));
Q=max([QQ1 QQ2]);
for i=1:Q+1
    switch i-1
        case 0
            at0=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa0=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
        case 1
            at1=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa1=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
        case 2
            at2=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa2=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            at3=0;aa3=0;
        case 3
            at3=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa3=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
    end
end
c1=[at3 at2 at1 at0-t1_max];
c2=[aa3 aa2 aa1 aa0-t2_max];
[n1_max,n1_min]=fun_r(c1,nn1_min);
[n2_max,n2_min]=fun_r(c2,nn2_min);
nx1_max=min([100 n1_max]);
nx2_max=min([100 n2_max]);
nx1_min=n1_min;nx2_min=n2_min;

```

**37 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ (М –
ФАЙЛИ: fun_aa1.m і fun_aa2.m)**

```
function ai=fun_aa1(a,q,Q,i,z)
x(1)=0;x(2)=z(2);x(3)=z(3);x(4)=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
```

```
function ai=fun_aa2(a,q,Q,i,z)
x(1)=z(2);x(2)=0;x(3)=z(3);x(4)=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
```

**38 ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛ: fun_r.m)**

```
function [nn,nm]=fun_r(c,n_min)
r=roots(c);
[n,m]=size(r);
j=1;
for i=1:n
    if imag(r(i))~=0
        continue
    else
        if r(i)>0
            u(j)=r(i);j=j+1;
        end
    end
end
if j==1
    n_max=100;
else
    n_max=max(u);
end
nn=n_max;
if (n_min<min(u))&(min(u)<max(u))
    nm=min(u);
else
    nm=n_min;
end
```

ДОДАТОК К

ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (SCRIPT - ФАЙЛ)

```

%Задача оптимізації
%Задайте в такому пор-ку КС-39"УПУ",КС-21"СОЮЗ",КС-39"ПРОГРЕС":
%Загальна продуктив.КС в н.куб.м/хв
Q_max=104160;
%К_ть прац.компресорів в кожній із груп
N1=1;N2=2;N3=2;
%Вартість палив.газу за 1000 н.куб.м (грн)
Cg=276.25;
%Вартість електроен. за 1 кВт/год (грн)
Ce=0.2;
%Темпер.газу на вході в нагнітач
tvг=20;
%Степінь стис.газу
E=1.35;
%Тиск на вх.нагнітача
Pvg=49;
%Темпер.навколишнього середовища
tc=-6;
global zet;
global zet1;
zet=[tvг E Pvg tc];
zet1=[Q_max N1 N2 N3 Cg Ce];
%Початкові обмеж.обертів нагнітача
nn1_min=80;nn2_min=80;nn3_min=80;
%Задайте обмеж.(темп.газу на вих.нагнітачів)
t1_max=54;t2_max=51;t3_max=48;
[ntx1_max,ntx2_max,ntx3_max,ntx1_min,ntx2_min,ntx3_min]=fun_ogr(t1_max,t2_max,t3_max
,....
nn1_min,nn2_min,nn3_min,zet);
%Задайте обмеж.(темп.вихлоп.газів)
tv1_max=495;tv2_max=460;
%Задайте обмеж.(макс.струм приводу,А)
ip_max=1290;
[ngx1_max,ngx2_max,ngx3_max,ngx1_min,ngx2_min,ngx3_min]=fun_ogr1(tv1_max,tv2_max,
ip_max,...
nn1_min,nn2_min,nn3_min,zet);
nx1_min=max([ntx1_min,ngx1_min]);
nx2_min=max([ntx2_min,ngx2_min]);
nx3_min=max([ntx3_min,ngx3_min]);
nx1_max=min([ntx1_max,ngx1_max]);
nx2_max=min([ntx2_max,ngx2_max]);
nx3_max=min([ntx3_max,ngx3_max]);
%Програма оптимізації
%Задайте стартову точку
x0=[90,90,90];
if x0(1)<nx1_min x0(1)=nx1_min+0.5; end
if x0(2)<nx2_min x0(2)=nx2_min+0.5; end

```

```
if x0(3)<nx3_min x0(3)=nx3_min+0.5; end
options=optimset('LargeScale','off');
lb=[nx1_min,nx2_min,nx3_min];ub=[nx1_max,nx2_max,nx3_max];
[x,Gval,exitflag]=fmincon(@fun_G,x0,[],[],[],[],lb,ub,@fun_ceq,options,zet,zet1);
```

**К1. ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ (М –
ФАЙЛ: fun_G.m)**

```
function G=fun_G(x,zet,zet1)
load QG.mat;load QA0.mat;
load aG.mat;load aQA.mat;
load QEP_B.mat;load aEP_B.mat;
z1=x(1);z2=x(2);z3=x(3);
R1=fun_R1(z1,aG,QG,zet);
R2=fun_R2(z2,aQA,QA0,zet);
R3=fun_R3(z3,aEP_B,QEP_B,zet);
G=0.06*zet1(5)*(zet1(2)*R1+zet1(3)*R2)+1000*zet1(6)*zet1(4)*R3;
```

**К2. ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛ: fun_ceq.m)**

```
function [c,ceq]=fun_ceq(x,zet,zet1)
tz1=x(1);tz2=x(2);tz3=x(3);
load QG1.mat;load aG1.mat;
load QQN.mat;load aQN.mat;
load QEQ_B.mat;load aEQ_B.mat;
R1=fun_R1(tz1,aG1,QG1,zet);
R2=fun_R2(tz2,aQN,QQN,zet);
R3=fun_R3(tz3,aEQ_B,QEQ_B,zet);
ceq=zet1(2)*R1+zet1(3)*R2+zet1(4)*R3-zet1(1);
c=[];
```


**К3. ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ (М –
ФАЙЛИ: fun_R1.m, fun_R2.m і fun_R3.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
```

```
function f=fun_R3(zz,a,q,z)
xz(1)=z(3);
xz(2)=z(2);xz(3)=z(4);xz(4)=zz;
[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
```

**К4. ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ (М –
ФАЙЛ: fun_org.m)**

```

function
[nx1_max,nx2_max,nx3_max,nx1_min,nx2_min,nx3_min]=fun_ogr(t1_max,t2_max,t3_max,...
    nn1_min,nn2_min,nn3_min,zet)
load QTW;load aTW;
load QT0;load aTA;
load QET_B;load aET_B;
q1=QTW;a1=aTW;
q2=QT0;a2=aTA;
q3=QET_B;a3=aET_B;
QQ1=max(max(q1));
QQ2=max(max(q2));
QQ3=max(max(q3));
Q=max([QQ1 QQ2 QQ3]);
for i=1:Q+1
    switch i-1
        case 0
            at0=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa0=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap0=fun_a3(a3,q3,QQ3,i,zet);
        case 1
            at1=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa1=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap1=fun_a3(a3,q3,QQ3,i,zet);
        case 2
            at2=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa2=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap2=fun_a3(a3,q3,QQ3,i,zet);
        case 3
            at3=fun_a1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa3=fun_a2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap3=fun_a3(a3,q3,QQ3,i,zet);
    end
end
c1=[at3 at2 at1 at0-t1_max];
c2=[aa3 aa2 aa1 aa0-t2_max];
c3=[ap3 ap2 ap1 ap0-t3_max];
[n1_max,n1_min]=fun_r(c1,nn1_min);
[n2_max,n2_min]=fun_r(c2,nn2_min);
[n3_max,n3_min]=fun_r(c3,nn3_min);
nx1_max=min([100 n1_max]);
nx2_max=min([100 n2_max]);
nx3_max=min([100 n3_max]);
nx1_min=n1_min;nx2_min=n2_min;nx3_min=n3_min;

```

**К5. ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛИ: fun_a1.m, fun_a2.m і fun_a3.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
```

```
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
```

```
function ai=fun_a3(a,q,Q,i,z)
x(1)=z(3);x(2)=z(2);x(3)=z(4);
x(4)=0;x(5)=z(1);
ai=0;[m,kf]=size(q);
  for p=1:kf
    if q(4,p)==i-1
      pr=1;
      for k=1:m
        if k~=4
          pr=pr*x(k)^q(k,p);
        end
      end
      ai=ai+a(p)*pr;
    end
  end
end
```

**К6. ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛ: fun_ogr1.m)**

```

function
[nx1_max,nx2_max,nx3_max,nx1_min,nx2_min,nx3_min]=fun_ogr1(t1_max,t2_max,t3_max,...
    nn1_min,nn2_min,nn3_min,zet)
load QGG1;load aGG1;
load QTT1;load aTT1;
load QEI_B;load aEI_B;
q1=QGG1;a1=aGG1;
q2=QTT1;a2=aTT1;
q3=QEI_B;a3=aEI_B;
QQ1=max(max(q1));
QQ2=max(max(q2));
QQ3=max(max(q3));
Q=max([QQ1 QQ2 QQ3]);
for i=1:Q+1
    switch i-1
        case 0
            at0=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa0=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap0=fun_aa3(a3,q3,QQ3,i,zet);
        case 1
            at1=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa1=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap1=fun_aa3(a3,q3,QQ3,i,zet);
        case 2
            at2=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa2=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap2=fun_aa3(a3,q3,QQ3,i,zet);
            at3=0;aa3=0;ap3=0;
        case 3
            at3=fun_aa1(a1,q1,QQ1,i,zet);
            aa3=fun_aa2(a2,q2,QQ2,i,zet);
            ap3=fun_aa3(a3,q3,QQ3,i,zet);
    end
end
c1=[at3 at2 at1 at0-t1_max];
c2=[aa3 aa2 aa1 aa0-t2_max];
c3=[ap3 ap2 ap1 ap0-t3_max];
[n1_max,n1_min]=fun_r(c1,nn1_min);
[n2_max,n2_min]=fun_r(c2,nn2_min);
[n3_max,n3_min]=fun_r(c3,nn3_min);
nx1_max=min([100 n1_max]);
nx2_max=min([100 n2_max]);
nx3_max=min([100 n3_max]);
nx1_min=n1_min;nx2_min=n2_min;nx3_min=n3_min;

```

**К7. ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РЕЖИМУ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ КОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТИВ (М –
ФАЙЛИ: fun_aa1.m, fun_aa2.m і fun_aa3.m)**

```
function ai=fun_aa1(a,q,Q,i,z)
x(1)=0;x(2)=z(2);x(3)=z(3);x(4)=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
```

```
function ai=fun_aa2(a,q,Q,i,z)
x(1)=z(2);x(2)=0;x(3)=z(3);x(4)=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
```

```
function ai=fun_aa3(a,q,Q,i,z)
x(1)=z(3);x(2)=z(2);x(3)=0;
ai=0;[m,kf]=size(q);
  for p=1:kf
    if q(3,p)==i-1
      pr=1;
      for k=1:m
        if k~=3
          pr=pr*x(k)^q(k,p);
        end
      end
      ai=ai+a(p)*pr;
    end
  end
end
```

ДОДАТОК Л

ТЕКСТ ПРОГРАМИ –ІНТЕГРАТОРА ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ

```
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").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 = txttvv.Value
    Worksheets("Лист2").Activate
        Range("B40").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=R[5]C/R[4]C"
    Calculate
    txtE.Value = Worksheets("Лист2").Range("b40").Value
    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
SolverOk SetCell:="$A$36", MaxMinVal:=2, ValueOf:="0", ByChange:="$B$26:$D$26"
```

```

SolverSolve
Range("B26:D26").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Sheets("Лист2").Select
Range("B25:D25").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("Лист1").Select
Range("A31:D31").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Sheets("Лист2").Select
Range("A30:D30").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
Sheets("Лист1").Select
Range("A36:D36").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Sheets("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
Sheets("Лист2").Select
Range("B15:C16").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:= _
False, Transpose:=False
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),tvq=daniexcel(4),Pvg=
daniexcel(5),Pvux=daniexcel(6),Cg=daniexcel(7),Ce=daniexcel(8),N1=daniexcel(9),N2=daniexc
el(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"

```

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

Л1. ТЕКСТ ПРОГРАМИ ОБ'ЄКТНОГО ПІДВІКНА АДАПТАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГПА

```
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 wParam As Long, ByVal lParam As Any) As Long
Private Declare Function PostMessage Lib "user32" Alias "PostMessageA" (ByVal hwnd 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
    Dim sWindowName As String
    'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
    sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UNION1]"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    'lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
    lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
```

```
    Range("C12").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
    Calculate
    Range("C13").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C""")"
    Calculate
    Range("C14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C1""")"
    Calculate
    Range("C15").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C2""")"
    Calculate
    Range("C16").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C3""")"
    Calculate
    sWindowName = "Figure No. 1"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
    Range("D17").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLClose()"
    Calculate
```

End Sub

```

Private Sub CommandButton11_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-21-PROGRES1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
Calculate
Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
Calculate
Range("E14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C1""")"
Calculate
sWindowName = "Figure No. 1"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton12_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-21-PROGRES1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
Calculate
Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
Calculate
Range("E15").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C2""")"
Calculate
sWindowName = "Figure No. 1"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton13_Click()
Dim sWindowName As String

```

```

'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UPU1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UNION1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
ActiveSheet.Shapes("Object 4").Select
Selection.Verb
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton14_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-21-PROGRES1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
Calculate
Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
Calculate
Range("E16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C3""")"
Calculate
sWindowName = "Figure No. 1"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton15_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-21-PROGRES1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
Calculate
Range("C12").Select

```

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
    Calculate
    Range("E13").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C""")"
    Calculate
'sWindowName = "Figure No. 1"
'hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
'IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
'IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

Private Sub CommandButton17_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UNION1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
'IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
    Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
    Calculate
    Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
    Calculate
    Range("C14").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C1""")"
    Calculate
    sWindowName = "Figure No. 1"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)

End Sub

Private Sub CommandButton18_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UNION1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
'IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
    Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
    Calculate
    Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
    Calculate
    Range("C15").Select

```

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C2""")"
    CalculateWindowName = "Figure No. 1"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)

```

End Sub

```
Private Sub CommandButton19_Click()
```

```

    Dim sWindowName As String
    'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
    sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UPU1]"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
    'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
    sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-21-PROGRES1]"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)

```

```
ActiveSheet.Shapes("Object 5").Select
```

```
Selection.Verb
```

End Sub

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
Worksheets("Лист4").Activate
```

```
Range("B11").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
```

```
    Calculate
```

```
ActiveSheet.Shapes("Object 6").Select
```

```
Selection.Verb
```

```
    Dim sWindowName As String
```

```
    'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
```

```
    sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UPU1]"
```

```
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
```

```
    ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
```

```
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
```

```
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
```

```
    Range("A12").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
```

```
    Calculate
```

```
Range("A13").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C""")"
```

```
    Calculate
```

```
    Range("A14").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C1""")"
```

```
    Calculate
```

```
    Range("A15").Select
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C2""")"
```

```

        Calculate
        Range("A16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C3""")"
        Calculate
        sWindowName = "Figure No. 1"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
        IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
        IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
        Range("B17").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLClose()"
        Calculate
End Sub

Private Sub CommandButton20_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UNION1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
        Calculate
        Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
        Calculate
        Range("C16").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C3""")"
        Calculate
        sWindowName = "Figure No. 1"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
        IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
        IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)

End Sub

Private Sub CommandButton21_Click()
Dim sWindowName As String
'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UNION1]"
hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
        Calculate
        Range("C12").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"

```

```

    Calculate
    Range("C13").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_1C""")"
    Calculate
    ' sWindowName = "Figure No. 1"
    ' hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    ' lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    ' lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()
    Worksheets("Лист4").Activate
    Range("F11").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
    Calculate
    ActiveSheet.Shapes("Object 4").Select
    Selection.Verb
    Dim sWindowName As String
    'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
    sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-21-PROGRES1]"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    ' lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
    lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)

    Range("E12").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
    Calculate
    Range("E13").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C""")"
    Calculate
    Range("E14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C1""")"
    Calculate
    Range("E15").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C2""")"
    Calculate
    Range("E16").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_2C3""")"
    Calculate
    sWindowName = "Figure No. 1"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
    Range("F17").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLClose()"
    Calculate
End Sub

Private Sub CommandButton4_Click()
    sWindowName = "Перерахунок параметрів моделі KC"

```



```

hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton5_Click()
Dim sWindowName As String
    'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
    sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UPU1]"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
    Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
    Calculate
    Range("C12").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
    Calculate
    Range("A14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C1""")"
    Calculate
    sWindowName = "Figure No. 1"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton6_Click()
Dim sWindowName As String
    'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
    sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UPU1]"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
    Worksheets("Лист4").Activate
Range("D11").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
    Calculate
    Range("C12").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
    Calculate
    Range("A15").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C2""")"
    Calculate
    sWindowName = "Figure No. 1"
    hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
    IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
    IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton7_Click()
Dim sWindowName As String
  'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
  sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-21-PROGRES1]"
  hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
  ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
  IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
  IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
  sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
  sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UNION1]"
  hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
  ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
  IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
  IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
  ActiveSheet.Shapes("Object 6").Select
  Selection.Verb
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton8_Click()
Dim sWindowName As String
  'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
  sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UPU1]"
  hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
  ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
  IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
  IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
  Worksheets("Лист4").Activate
  Range("D11").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
  Calculate
  Range("C12").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
  Calculate
  Range("A16").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C3""")"
  Calculate
  sWindowName = "Figure No. 1"
  hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
  IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
  IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton9_Click()
Dim sWindowName As String
  'sWindowName = "Mathcad Professional - [Mathcad в Книга1]"
  sWindowName = "Mathcad Professional - [KC-39-UPU1]"
  hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
  ' IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, SW_SHOWMINIMIZED)
  IRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
  IRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
  Worksheets("Лист4").Activate

```

```
Range("D11").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLOpen()"
  Calculate
  Range("C12").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""cd c:\T_DP\Z""")"
  Calculate
  Range("A13").Select
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MLEvalString("""MNK_18_2_C""")"
  Calculate
  ' sWindowName = "Figure No. 1"
  ' hwndMathcad = FindWindow(vbNullString, sWindowName)
  ' lRetVal = ShowWindow(hwndMathcad, 2)
  ' lRetVal = PostMessage(hwndMathcad, &H10, 0&, 0&)
End Sub
Private Sub Frame3_Click()

End Sub
Private Sub UserForm_Click()
End Sub
```

ДОДАТОК М

Апроксимація приведених характеристик нагнітача PCL-804-2

Вводимо вихідні масиви для приведених характеристик нагнітача:

Політропний коефіцієнт корисної дії
 $\eta = F(Q_{np})$

data :=

350	0.73
400	0.779
450	0.816
500	0.838
550	0.846
600	0.838
650	0.819
700	0.7895
740	0.76

Відносна потужність
 $N_{np} = F(Q_{np})$

data1 :=

350	453.7
400	502.6
450	546.3
500	583.5
550	615.7
600	644
650	666.9
700	686.4
740	698

Ступінь стискування $\varepsilon = F(Q_{np}, n_{np})$

data2 :=

	0	1	2
0	350	1.1	1.643
1	400	1.1	1.633
2	450	1.1	1.618
3	500	1.1	1.603
4	550	1.1	1.588
5	600	1.1	1.573

data2 := submatrix(data2, 0, 80, 0, 2)

1. Апроксимація залежності політропічного коефіцієнта корисної дії.

Функціональну залежність $\eta = F(Q_{np})$ шукаємо методом найменших квадратів у вигляді полінома

$$\eta = \sum_{i=0}^k (a_k \cdot Q_{np}^k), \text{ де } k\text{-ступінь полінома; } a_k\text{-коефіцієнти апроксимації.}$$

X := data ⁽⁰⁾

Y := data ⁽¹⁾

n := rows(data)

n = ■

Задаємо степінь апроксимуючого полінома. k := 4

Розрахунок коефіцієнтів поліноміальної моделі методом МНК з застосуванням функції regress

$$z := \text{regress}(X, Y, k)$$

$$\text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x) \quad \text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$$

Коефіцієнти полінома

$$\text{coeffs}^T = (2.15618 \times 10^{-5} \quad 2.76226 \times 10^{-3} \quad -1.02106 \times 10^{-6} \quad -3.37867 \times 10^{-9} \quad 2.14693 \times 10^{-12})$$

Результати апроксимації.

$$k := \text{rows}(\text{coeffs})$$

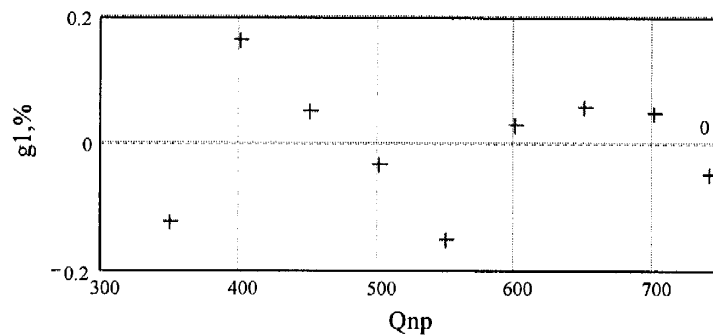
Оцінка точності моделі.

Оцінка дисперсії політропного к.к.д $D := \frac{1}{n-k} \cdot \sum (\text{fit}(X) - Y)^2$ $D = 1.22691 \times 10^{-6}$

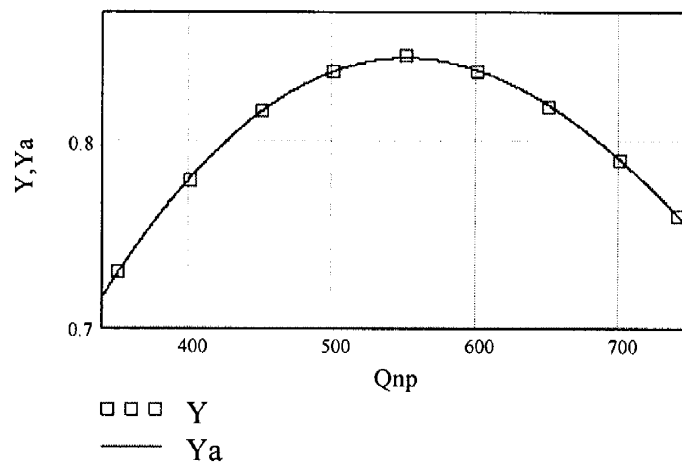
Середньоквадратичне відхилення $\sigma := \sqrt{D}$ $\sigma = 1.10766 \times 10^{-3}$

Відносне відхилення, % $g1 := 100 \cdot \left[\frac{(\text{fit}(X) - Y)}{Y} \right]$

Максимальна відносна похибка, % $\max(|g1|) = 0.16465$



Графічне відтворення результатів апроксимації



Формування візуального відображення виду моделі.

$$a0 := \begin{pmatrix} 2.15618 \times 10^{-5} \\ 2.76226 \times 10^{-3} \\ -1.02106 \times 10^{-6} \\ -3.37867 \times 10^{-9} \\ 2.14693 \times 10^{-12} \end{pmatrix} \quad v(Q) := \begin{pmatrix} 1 \\ Q \\ Q^2 \\ Q^3 \\ Q^4 \end{pmatrix}$$

2. Апроксимація залежності відносної приведеної потужності на нагнітачі.

Функціональну залежність $N=F(Q_{np})$ шукаємо методом найменших квадратів у вигляді полінома

$$N = \sum_{i=0}^k (a_k \cdot Q_{np}^k), \text{ де } k\text{-ступінь полінома; } a_k\text{-коефіцієнти апроксимації.}$$

$$X1 := \text{data1} \langle 0 \rangle \quad Y1 := \text{data1} \langle 1 \rangle \quad n1 := \text{rows}(\text{data1}) \quad n1 = 9$$

Задаємо степінь апроксимуючого полінома. $k1 := 3$

Розрахунок коефіцієнтів поліноміальної моделі методом МНК з застосуванням функції regress

$$z1 := \text{regress}(X1, Y1, k1)$$

$$\text{fi}(x1) := \text{interp}(z1, X1, Y1, x1) \quad \text{coeffs1} := \text{submatrix}(z1, 3, \text{length}(z1) - 1, 0, 0)$$

Параметри моделі.

$$\text{coeffs1}^T = (-75.91492 \quad 2.03819 \quad -1.64225 \times 10^{-3} \quad 4.07689 \times 10^{-7})$$

Результати апроксимації.

Оцінка точності моделі.

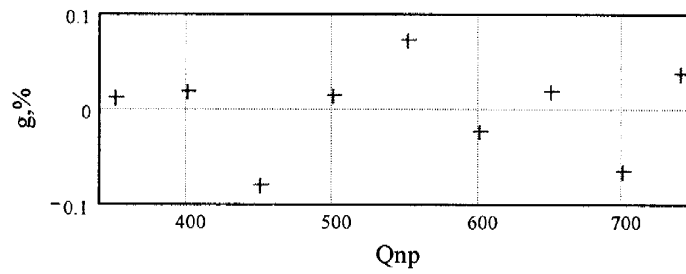
Оцінка точності моделі.

$$\text{Оцінка дисперсії приведеної потужності: } D := \frac{1}{n1 - k1} \cdot \sum (\text{fi}(X1) - Y1)^2 \quad D = 0.14008$$

$$\text{Середньоквадратичне відхилення } \sigma := \sqrt{D} \quad \sigma = 0.37427$$

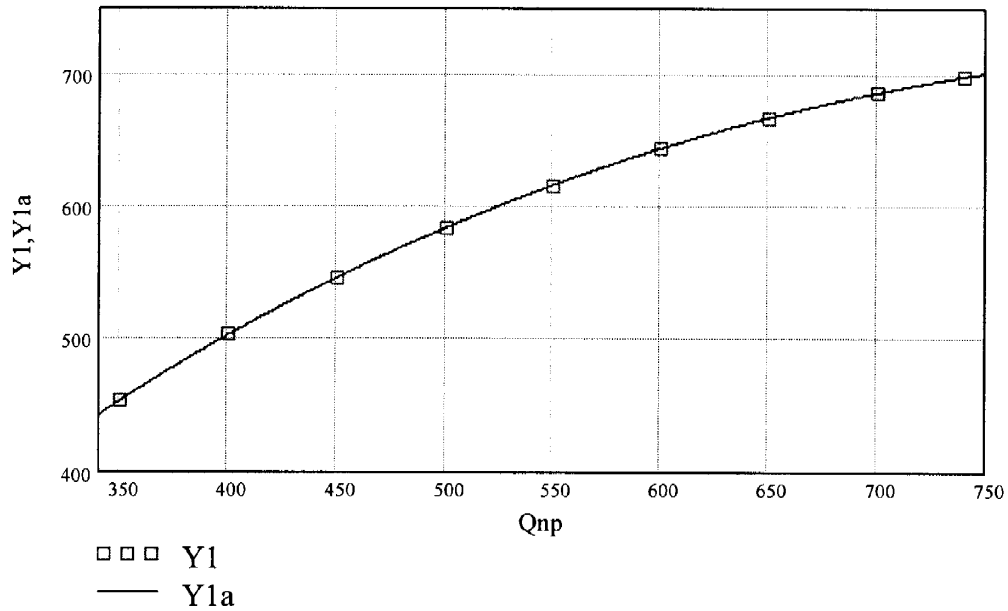
$$\text{Відносне відхилення, \% } g := 100 \cdot \left[\frac{(\text{fi}(X1) - Y1)}{Y1} \right]$$

$$\text{Максимальна відносна похибка, \%: } \max(|g|) = 0.07966$$



+++ g

Графічне відтворення результатів апроксимації



Формування візуального відображення виду моделі.

$$c(Q) := \begin{pmatrix} 1 \\ Q \\ Q^2 \\ Q^3 \end{pmatrix} \quad a := \begin{pmatrix} -75.91492 \\ 2.03819 \\ -1.64225 \times 10^{-3} \\ 4.07689 \times 10^{-7} \end{pmatrix}$$

$$Nnp(Q) := a^T \cdot c(Q) \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{float, 6} \end{array} \rightarrow -75.9149 + 2.03819Q - 1.64225 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2 + 4.07689 \cdot 10^{-7} \cdot Q^3$$

$$Nnp(650) = 667.01957$$

3. Апроксимація залежності ступеня стискування газу нагнітачем.

Функціональну залежність $\varepsilon = F(Q_{np}, n_{np})$ шукаємо методом Брандона та МНК з відбором кращої моделі.

Формування вихідних масивів даних.

$$Q_{np} := \text{data2} \langle 0 \rangle \quad n := \text{data2} \langle 1 \rangle \quad \varepsilon := \text{data2} \langle 2 \rangle \quad n2 := \text{rows}(\text{data2}) \quad n2 = 81$$

3.1 Розрахунок за методом Брандона

Модель багатовимірного об'єкта за даним методом знаходиться у такому вигляді

$$Y_a(X_1, X_2, \dots, X_n) = \mu_y \cdot \prod_{i=1}^n F_i(X_i),$$

де μ_y - математичне очікування вибірки $Y_{F_i(X_i)}$ - апроксимуючі функції, які підбирають наближенням поліномів K -степені за методом МНК.

Для нашого випадку модель шукатимемо у такому вигляді $\varepsilon = \mu_y F(Q_{np}) F(n_{np})$

$$\mu_y := \text{mean}(\varepsilon) \quad \varepsilon_1 := \frac{\varepsilon}{\mu_y} \quad \text{Нормалізація експериментальних даних}$$

$$\mu_y = 1.37906$$

Розрахунок коефіцієнтів поліноміальної моделі $F(Q_{np})$ методом МНК

Задаємо степінь першого апроксимуючого полінома. $k_2 := 4$

$$f_1 := \text{regress}(Q_{np}, \varepsilon_1, k_2)$$

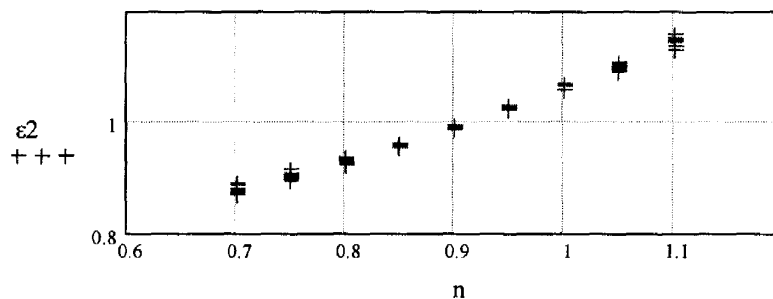
$$f_1(x_1) := \text{interp}(f_1, Q_{np}, \varepsilon_1, x_1) \quad \text{coeffs}_1 := \text{submatrix}(f_1, 3, \text{length}(f_1) - 1, 0, 0)$$

$$\text{coeffs}_1^T = (6.64859 \times 10^{-5} \quad 8.51735 \times 10^{-3} \quad -2.56311 \times 10^{-5} \quad 3.33621 \times 10^{-8} \quad -1.61393 \times 10^{-11})$$

Нормалізуємо дані виключаючи вплив $F(Q_{np})$

$$\varepsilon_{2_u} := \frac{\varepsilon_{1_u}}{f_1(Q_{np_u})} \quad u := 0..n2-1$$

Графічна інтерпретація нормалізації



Розрахунок коефіцієнтів поліноміальної моделі $F(n)$ методом МНК

Задаємо степінь першого апроксимуючого полінома. $k3 := 3$

$$f2 := \text{regress}(n, \varepsilon2, k3)$$

$$\text{fit1}(x2) := \text{interp}(f2, n, \varepsilon2, x2) \quad \text{coeffs2} := \text{submatrix}(f2, 3, \text{length}(f2) - 1, 0, 0)$$

$$\text{coeffs2}^T = (0.81085 \quad -0.30481 \quad 0.60913 \quad -0.05175)$$

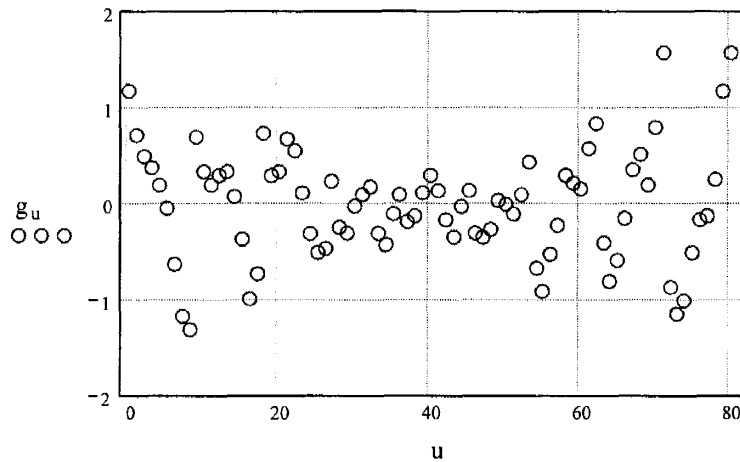
Результати апроксимації.

Оцінка точності моделі

$$u := 0..n2 - 1$$

Відносна похибка апроксимації :

$$g_u := 100 \left[\frac{\varepsilon_u - (\text{My} \cdot \text{fit1}(n_u) \cdot \text{fit}(Qnp_u))}{\varepsilon_u} \right]$$



Максимальна відносна похибка, %

$$g1_u := |g_u| \quad \max(g1) = 1.57818$$

3.2 Розрахунок за методом МНК

Модель багатовимірного об'єкта за даним методом знаходиться у такому вигляді

$$\varepsilon = \sum_{(i,j)} a_{ij} \cdot Qnp^i \cdot n^j, \quad \text{при } i + j \leq k,$$

де k -максимальний порядок поліномів;
 a_{ij} -коефіцієнти моделі.

Формування вихідних масивів даних. для функції $\text{regress}(XY, ZV, k)$, приймаємо $k := 3$

$XY := \text{submatrix}(\text{data2}, 0, 80, 0, 1)$ $ZV := \text{submatrix}(\text{data2}, 0, 80, 2, 2)$
 $X := \text{submatrix}(\text{data2}, 0, 80, 0, 0)$ $Y := \text{submatrix}(\text{data2}, 0, 80, 1, 1)$

Розрахунок коефіцієнтів поліноміальної моделі методом МНК з застосуванням двопараметричної функції regress

$rs := \text{regress}(XY, ZV, k)$
 $F(x, y) := \text{interp}\left[rs, XY, ZV, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right]$ $F(350, .9) = 1.41153$

параметри моделі.

$\text{coeffs3} := \text{submatrix}(rs, 3, \text{length}(rs) - 1, 0, 0)$ $\xrightarrow{\hspace{2cm}}$
 $as := \text{coeffs3}$

Результати апроксимації.

Оцінка точності моделі .

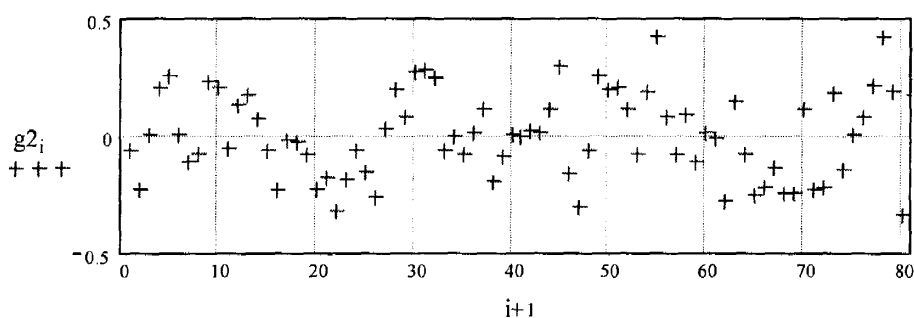
$k2 := \text{rows}(\text{coeffs3})$ $k2 = 10$

Оцінка дисперсії ступеня стисливості $D := \frac{1}{n2 - k2} \cdot \sum (F(Qnp, n) - ZV)^2$

Середньоквадратичне відхилення $\sigma := \sqrt{D}$ $\sigma = 2.60207 \times 10^{-3}$
 $i := 0..n2 - 1$

Відносна похибка апроксимації : $g2_i := 100 \cdot \frac{(F(Qnp_i, n_i) - ZV_i)}{ZV_i}$

Максимальна відносна похибка, % $g3_i := |g2_i|$ $\max(g3) = 0.42191$



Таким чином наближення за МНК є точнішим за точністю апроксимації.

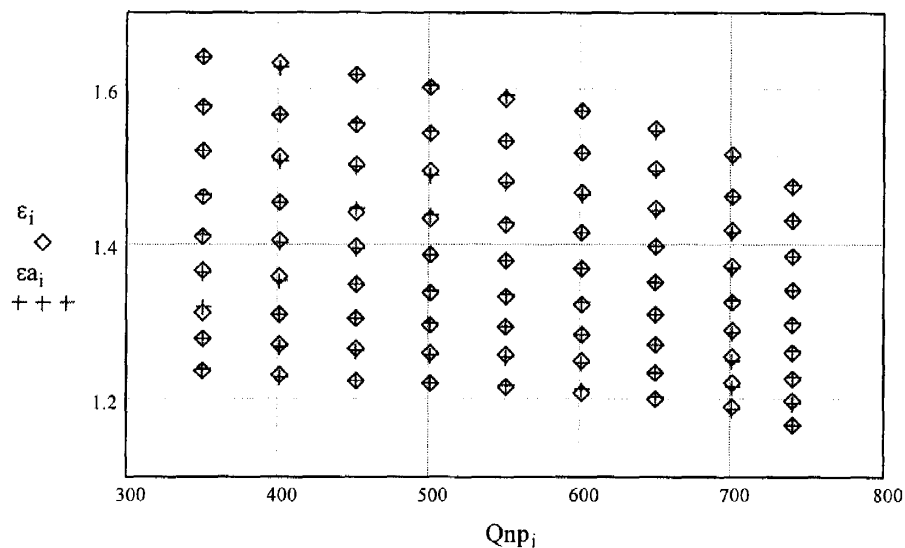
Формування візуального відображення виду моделі.

$$a1 := \begin{pmatrix} -3.29884 \cdot 10^{-4} \\ -0.06734 \\ 1.01075 \\ -0.74958 \\ 1.32214 \cdot 10^{-3} \\ -1.21674 \cdot 10^{-6} \\ 1.64003 \\ -2.86388 \cdot 10^{-3} \\ 4.96877 \cdot 10^{-6} \\ -2.7664 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix} \quad s(Q, n) := \begin{pmatrix} Q \cdot n^2 \\ n^3 \\ n^2 \\ n^1 \\ Q \cdot n^1 \\ Q^2 \cdot n \\ 1 \\ Q \cdot n^0 \\ Q^2 \\ Q^3 \end{pmatrix}$$

Графічне відтворення результатів апроксимації

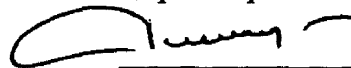
$$AT := XY^T \quad i := 0.. \text{cols}(AT) - 1 \quad \varepsilon a_i := \text{interp} \left[rs, XY, ZV, \begin{pmatrix} AT_{0,i} \\ AT_{1,i} \end{pmatrix} \right]$$

$$\varepsilon := ZV \quad ZV1 := \varepsilon a$$



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

директор УМГ “Прикарпаттрансгаз”



В. П. Рудко /

“ 18 ”

2005р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

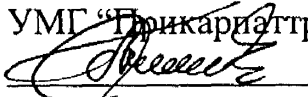
Комісія в складі представників управління магістральних газопроводів “Прикарпаттрансгаз”: начальника Богородчанського ЛВУМГ Слободяна Володимира Івановича, начальника виробничого відділу АТ і АСУ “Прикарпаттрансгаз” Кучмія Євгена Антоновича та представників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу: завідувача кафедри комп’ютерних систем і мереж (КСМ), д.т.н., професора ГОРБІЙЧУКА Михайла Івановича, пошукача кафедри КСМ КОВАЛІВА Євстахія Осиповича склали цей акт в тому, що 18.01.2005 р. прийняті до впровадження на Богородчанській КС наступні результати дисертаційної роботи “Оптимізація роботи паралельно працюючих газоперекачувальних агрегатів з різними приводами”: програмне забезпечення обробки та побудови математичних моделей КС та ГПА з різними приводами; програмне забезпечення оптимізаційної задачі розподілу навантаження між КС Богородчанського ЛВУМГ при їх паралельній роботі; програма розрахунку техніко - технологічних показників роботи ГПА. Програмні продукти інтегровані у вигляді об’єктного вікна в структуру штатної системи керування КС і функціонує в режимі “порадника оператора”. Очікуваний економічний ефект від впровадження за рахунок зниження затрат на компримування газу складає 2 797 тис. гривень в цінах 2004 р.

від УМГ “Прикарпаттрансгаз”

начальник Богородчанського
ЛВУМГ / Слободян В. І. /

начальник ВВ АТ і АСУ


УМГ “Прикарпаттрансгаз”

 / Кучмій Є. А. /

від ІФНТУНГ

науковий керівник роботи, завідувач
кафедри КСМ, д. т. н., професор / Горбійчук М. І. /

пошукач кафедри КСМ

 / Ковалів Є. О. /

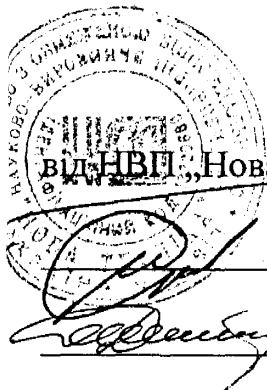
ДОДАТОК П

АКТ

17 серпня 2005 р.

м. Львів

Ми, що нижче підписалися, директор ТзОВ НВП „Нова техніка” ЮРЕВИЧ Михайло Тадейович, провідний інженер ТзОВ НВП „Нова техніка” ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Ярослав Михайлович, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж (КСМ) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, д.т.н., професор ГОРБІЙЧУК Михайло Іванович, пошукач кафедри КСМ КОВАЛІВ Євстахій Осипович, начальник виробничого відділу автоматизації виробництва КУЧМІЙ Євген Антонович склали цей акт в тому, що 17 серпня 2005 р. НВП „Нова техніка” прийнято до впровадження у виробництво матеріали дисертаційної роботи пошукача кафедри КСМ КОВАЛІВА Є. О. на тему „Оптимізація роботи паралельно працюючих газоперекачувальних агрегатів з різними приводами”. Результати вказаної роботи будуть враховані при розробці документації для створення та впровадження модернізованих систем автоматичного керування КС „Богородчани”.



від НВП „Нова техніка”

Юревич М. Т.

Добровольський Я.М.

від УМГ „Прикарпаттрансгаз”

Кучмій Є. А.

від ІФНТУНГ

науковий керівник роботи, завідувач кафедри КСМ, д.т.н., професор

Горбійчук М. І.

пошукач кафедри КСМ

Ковалів Є. О.