

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"

**Тевяшева Ольга Андріївна**

УДК 656.56:658.012.011.56:656.56:681.3

**ОПЕРАТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ  
АВТОМАТИЗОВАНОЇ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ  
В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ГАЗОСПОЖИВАННЯ**

Спеціальність 05.13.07 - Автоматизація технологічних процесів

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2004



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
Любчик Леонід Михайлович,  
Національний технічний університет "Харківський  
політехнічний інститут", завідувач кафедри комп'ютерної  
математики і математичного моделювання

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
Кузнєцов Борис Іванович,  
Національний технічний університет "Харківський  
політехнічний інститут", професор кафедри  
колісних і гусеничних машин

доктор технічних наук, професор  
Самойленко Микола Іванович,  
Харківська національна академія  
міського господарства, завідувач кафедри  
інформаційних технологій

**Провідна установа:** Науково-виробнича корпорація "Київський інститут  
автоматики" Міністерства промислової політики  
України, м. Київ

Захист відбудеться " 4 " листопада 2004 р. о 15.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий "1" жовтня 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Є. Голоскоков



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підвищення ефективності, надійності та безпеки функціонування газотранспортної системи (ГТС) України значною мірою пов'язано з удосконаленням систем управління режимами роботи технологічних об'єктів ГТС та системи в цілому. Як об'єкт управління ГТС відноситься до класу багатомірних нелінійних стохастичних систем із розподіленими параметрами, для яких характерні мережна багаторівнева структура, наявність безперервних та дискретних керуючих впливів, високий рівень невизначеності структури, пара-метрів, стану, а також впливів з боку навколишнього середовища.

Незважаючи на відносно поширене впровадження на об'єктах ГТС України комплексів автоматичного та автоматизованого управління, зараз, як і раніше, значною залишається роль диспетчера. Для підтримки прийняття рішень диспетчером ГТС необхідна розробка і впровадження ефективного математичного та інформаційного забезпечення, особливо щодо аналізу і оптимізації режимів функціонування окремих об'єктів ГТС та системи у цілому.

На теперішній час накопичено значний досвід з моделювання та оптимізації режимів роботи ГТС. Суттєвий вклад в удосконалення методів моделювання та оптимізації стаціонарних та нестаціонарних режимів транспорту та розподілення природного газу в ГТС, моделювання режимів роботи технологічного обладнання ГТС внесено роботами Сухарева М.Г., Ставровського Е.Р., Меренкова А.П., Бермана Р.Я., Жидкової М.О., Ковалко М.П., Євдокимова А.Г., Дубровського В.В., Притули М.Г. Однак, майже усі моделі і методи, що використовуються, не враховують як неповноту і недостовірність апріорної інформації про структуру та параметри ГТС, так і невизначеність реальних умов функціонування системи. Отримані з їх допомогою оптимальні рішення зазвичай знаходяться на границі області допустимих режимів, тому навіть незначні внутрішні або зовнішні збурення можуть призвести до того, що ці рішення стають недопустимими.

На етапі планування режимів роботи ГТС найзначнішим фактором невизначеності, що слід враховувати, є стохастичний характер процесів газоспоживання. Саме це надає актуальності задачі розробки таких математичних моделей та методів оперативного планування режимів роботи ГТС, що забезпечують отримання рішень, які є не тільки оптимальними за критеріями якості та ефективності, але й найстійкішими до прогнозованого рівня невизначеності газоспоживання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі системного аналізу і управління НТУ „ХПІ” відповідно до договору про творче співробітництво між Науково-дослідним та проектно-конструкторським інститутом автоматизованих систем управління транспор-

том газу (НДПАСУтрансгаз) та НТУ "ХП" згідно з тематичними планами наступних науково-технічних робіт, заданих ДК "Укртрансгаз" НАК "Нафтогаз України":

– “Супроводження та розвиток системи централізованого контролю роботи компресорного цеху на базі ПТК “Уніконт” (для Пролетарського ПСГ)”, план - завдання №14/99-21;

– “Разработка математического и программного обеспечения для решения задачи построения области допустимых режимов центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов с учетом погрешности измерений”, х.д. 39-31 1999-2000 р.;

– “Автоматизированная система управления КС “Тарутине” (АСУ КС “Тарутине)””, контракт між Генеральним підрядчиком компанією “Трансбалкан” (Туреччина) та Субпідрядчиком НДПАСУтрансгаз ДК “Укртрансгаз”, 2000р.;

– “Науково-технічне супроводження експлуатації та розвиток АСК ТП КС “Тарутине”, НДР №52-21/2002;

– “Розроблення та впровадження ІАСК ДК “Укртрансгаз” в межах базового об’єкта УМГ “Київтрансгаз”, НДР № 30-10/2000-2002;

– “Створення та впровадження САК КЦ із застосуванням контролерів “FANUC” для об’єктів, що реконструюються”, НДР №54-23/97-2003.

У зазначених роботах здобувач приймав участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка та реалізація методу оперативного планування режимів роботи автоматизованої газотранспортної системи в умовах невизначеності газоспоживання. Відповідно до зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені нижченаведені задачі.

1. Розробка математичних моделей технологічних об’єктів ГТС з урахуванням апріорної невизначеності умов їх функціонування.

2. Розробка критерію ступеня технологічної стійкості режиму роботи обладнання ГТС, а на його основі – узагальненого критерію ступеня технологічної стійкості режиму ГТС в цілому.

3. Формалізація задачі оперативного планування режимів роботи ГТС в умовах невизначеності газоспоживання.

4. Розробка способу декомпозиції задачі планування режиму роботи ГТС шляхом зведення її вирішення до розв’язання скінченної множини задач оптимізації локальних підсистем ГТС з наступною координацією отриманих рішень.

5. Розробка методики розв’язання багатокритеріальної задачі структурної та параметричної оптимізації локальної підсистеми ГТС.

6. Розробка методики розв'язання задачі координації рішень оптимізації локальних підсистем ГТС з взаємозв'язаними багатонитковими магістральними газопроводами (МГ) та багатоцеховими компресорними станціями (КС).

7. Здійснення програмної реалізації розроблених методик та алгоритмів орієнтовно до їх застосування в існуючих системах автоматизованого оперативного-диспетчерського управління технологічними об'єктами ГТС.

8. Проведення аналізу впливу ступеня невизначеності газоспоживання, а також граничних умов задачі оперативного планування режимів роботи ГТС на властивості рішень, що отримуються.

*Об'єктом дослідження* є автоматизований технологічний процес транспортування та розподілення природного газу в ГТС.

*Предметом дослідження* є математичні моделі технологічних об'єктів ГТС та методи розв'язання задачі автоматизованого оперативного планування режимів роботи ГТС в умовах невизначеності газоспоживання.

*Методи дослідження* базуються на положеннях та методах теорії гідравлічних ланцюгів, теорії графів, теорії випадкових процесів та теорії ймовірностей, методах математичної статистики, методах багатокритеріальної оптимізації та динамічного програмування.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У ході вирішення поставлених задач отримано такі наукові результати:

1. Вдосконалено математичні моделі технологічних об'єктів ГТС (лінійної ділянки (ЛД) багатониткового МГ, газоперекачувального агрегату, компресорного цеху та багатоцехової компресорної станції), що дозволило врахувати апріорну невизначеність умов їхнього функціонування.

2. Вперше запропоновано та формалізовано критерій ступеня технологічної стійкості режиму роботи ГТС до прогнозованого рівня зовнішніх збурень, що надало можливості врахувати фактор невизначеності газоспоживання під час розв'язанні задачі планування режимів роботи ГТС.

3. Вперше формалізовано задачу оперативного планування режиму роботи ГТС, що забезпечує отримання оптимальних рішень за критеріями економічної ефективності та ступеня технологічної стійкості режиму до прогнозованого рівня зовнішніх збурень, які викликані нерівномірністю газоспоживання.

4. Запропоновано спосіб розв'язання задачі оперативного планування режимів роботи ГТС, заснований на використанні специфічних властивостей існуючої структури та системи автоматизованого управління ГТС.

5. Вперше розв'язана задача багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою і векторними змінними стану та рішень на основі методу динамічного програмування.

6. Дістали подальшого розвитку методи структурної та параметричної оптимізації режимів роботи КЦ та багатоцехових КС, що надають можливості врахувати апріорну невизначеність умов їхнього функціонування.

**Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для:

- оптимізації режимів роботи технологічного обладнання ГТС;
- розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою та векторними змінними стану та рішень;
- формування диспетчерського графіка, що відповідає оптимальному плановому режиму роботи ГТС.

2. Розроблені алгоритми та програмне забезпечення застосовані для розрахунку та оптимізації режимів роботи газоперекачувального агрегату (ГПА), КЦ і багатониткових ЛД, реалізовані у НДПІАСУтрансгаз та впроваджені:

- на Пролетарському ПСГ при виконанні робіт з розвитку системи централізованого контролю роботи КЦ (акт упровадження від 15.06.2000 р.);
- на КЦ „Роменська КС-3” Сумського ЛВУ МГ у складі програмного забезпечення „АРМ змінного інженера” (акт упровадження від 12.12.2002 р.);
- на КС „Тарутине” у складі АРМ змінного інженера КС (акт упровадження від 23.08.2002 р.);
- на КС „Ужгород” у складі АСК технологічним процесом КЦ-1 (акт упровадження від 12.03.2003 р.).

3. Сформульовано практичні рекомендації щодо реалізації ресурсозберігаючих і технологічно стійких режимів транспорту та розподілення природного газу в ГТС.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. А саме: розроблено методику побудови областей допустимих режимів роботи ГПА, КЦ та КС з урахуванням невизначеності параметрів потоків газу на їхніх входах і виходах, запропоновано і формалізовано критерій ступеня технологічної стійкості режиму роботи ГТС, удосконалено метод динамічного програмування для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою та векторними змінними стану та рішень, удосконалено методи структурної та параметричної оптимізації режимів роботи КЦ та КС, розроблено комплекс алгоритмічного та програмного забезпечення формування диспетчерського графіка, що відповідає оптимальному плановому режиму роботи ГТС.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: VI-й Міжнародній науково-практичній конференції „Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпе-



чення людини” СИЭТ6-99 (м. Харків, 1999 р.); Всеросійському науковому семінарі “Математичні моделі та методи аналізу і оптимального синтезу трубопроводних й гідравлічних систем” (м. Москва, 2000 р.); Міжнародна конференція з управління „Автоматика - 2000” (м. Львів, 2000 р.); Міжнародній конференції TCSET'2002 (м. Львів, 2002 р.); Всеросійському науковому семінарі “Математичні моделі та методи аналізу і оптимального синтезу трубопроводних й гідравлічних систем” (м. Туапсе, 2002 р.);.

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботі опубліковано 8 робіт, з них 5 статей у наукових виданнях, що входять до Переліку ВАК України як фахові, 2 тези доповідей на наукових конференціях та 1 деклараційний патент на винахід.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації складає 142 сторінки. Робота містить 73 рисунки за текстом, 5 додатків на 43 сторінках та 71 найменування використаних літературних джерел на 6 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність проблеми, що розглядається у роботі, сформульована мета та визначені основні завдання досліджень, надана характеристика наукової новизни і практичної значущості отриманих результатів, наведені відомості про апробацію та практичну реалізацію результатів роботи.

У **першому розділі** розглянуто проблеми, що пов'язані з модернізацією та удосконаленням автоматизованої системи диспетчерського управління газотранс-портною системою, та проведено аналіз технологічної схеми типової ГТС, принципів і режимів її функціонування та організаційно-функціональної структури існуючої системи управління. У межах загальної постановки задачі автоматизованого управління ГТС визначено місце та значення її складової частини – задачі оперативного планування режимів роботи ГТС.

Проведено аналіз сучасних комплексів комп'ютерного моделювання та оптимізації режимів роботи ГТС та виявлено їхні недоліки і обмеження. Розглянуто базові методи математичного моделювання режимів роботи технологічного обладнання ГТС та зроблено огляд найпоширених методів розрахунку та оптимізації потокорозподілення у кільцевих трубопроводних системах.

Виділено основні фактори невизначеності умов функціонування ГТС та проаналізовано їхній вплив на якість процесів управління режимом роботи ГТС. Обґрунтовано необхідність урахування ступеня невизначеності обсягу газоспоживання при розробці постановки задачі оперативного планування режиму роботи ГТС з метою підвищення якості автоматизованого управління за рахунок підтримки прийняття рішень диспетчерами ГТС в умовах ризику та невизначеності.

Виконано огляд існуючих постановок та методів розв'язання задачі опера-тивного планування режимів роботи ГТС. Зазначено, що в них майже ніяким чином не враховується фактор невизначеності газоспоживання. Як базовий метод структурної та параметричної оптимізації ГТС запропоновано використати метод динамічного програмування, який необхідно вдосконалити для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою та векторними змінними стану та рішень.

Наведено обґрунтування вибору мети дисертаційної роботи і сформульовано основні задачі дослідження.

**Другий розділ** присвячений розробці та аналізу математичних моделей елементів ГТС із урахуванням фактору невизначеності умов їх функціонування.

З використанням методів теорії гідравлічних ланцюгів математичну модель сталого поточкорозподілення на ЛД МГ подано як систему нелінійних рівнянь зв'язку між витратою газу, падінням його тиску та температури за усіма ділянками труб та лінійних алгебраїчних рівнянь, що визначають умови узгодження параметрів газових потоків у вузлах мережі. Показано, що з формальної точки зору математична модель квазістаціонарного режиму транспортування газу на ЛД МГ з урахуванням стохастичного характеру процесів газоспоживання може бути отримана з моделі сталого поточкорозподілення шляхом заміни точкових значень граничних умов по витратах газу інтервальними, в яких із заданою ймовірністю знаходяться усі реалізації процесів газоспоживання на інтервалі часу, що розглядається. Розроблено метод визначення інтервальних оцінок значень параметрів газових потоків на входах та виходах ЛД, що є залежними від граничних умов.

Показано, що нерівномірність газоспоживання на інтервалі планування призводить до апіорної невизначеності параметрів газових потоків на входах КС. Вперше запропоновано враховувати цей фактор шляхом переходу від детермінованого методу побудови областей допустимих режимів роботи (ОДР) технологічного обладнання ГТС до стохастичного. На базі методів статистичної лінеаризації розроблено загальний підхід до оцінювання статистичних властивостей кожної граничної точки ОДР у залежності від статистичних властивостей вхідних даних.

Із застосуванням інженерної методики розрахунку ГПА розроблено методику побудови області гарантовано допустимих режимів роботи (ОГДР) ГПА з урахуванням апіорної невизначеності параметрів газових потоків на вході та виході нагнітача.

На відміну від існуючих математичних моделей компресорного цеху (КЦ) розроблена модель КЦ з  $N$  паралельно включеними повнонапірними ГПА, що враховує зміну напору і тиску газу на допоміжному обладнанні та у трубопроводі-

ній обв'язці цеху і дозволяє моделювати режими роботи КЦ з точністю, що є достатньою для розв'язання задач планування режимів.

Для урахування можливості розрахунку сумісних режимів роботи декількох КЦ, що працюють на одну нитку, розроблено математичну модель сталого поточкорозподілення на багатоцеховій КС. Обчислення границь ОДР КС потребує розв'язання відповідних систем нелінійних рівнянь, які зведено до систем, що вирішуються методом простих ітерацій. Урахування стохастичного характеру параметрів роботи КЦ та КС пропонується виконувати так само, як і для ГПА, з використанням методу статистичної лінеаризації.

На відміну від детермінованого підходу, математична постановка задачі оперативного планування режимів роботи ГТС в умовах невизначеності потребує використання критерію, який би характеризував стійкість режиму роботи обладнання ГТС до прогнозованого рівня зміни газоспоживання на плановому періоді. З цією метою в дисертаційній роботі вперше введено поняття “технологічної стійкості” режиму роботи відносно до об'єктів ГТС. Критерій ступеня технологічної стійкості режиму КЦ у дисертаційній роботі формалізовано як

$$J_{\text{КЦ}} = P \left[ \tilde{q}^- \leq \tilde{q} \leq \tilde{q}^+ \right] \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(q^-, q^+) dq^-, \quad (2)$$

де  $\tilde{q}^-$ ,  $\tilde{q}^+$  - випадкові значення границь ОДР ГПА (мінімально та максимально допустимі значення продуктивності ГПА),  $\tilde{q}$  - потрібна продуктивність КЦ, а  $f(q^-, q^+)$  - сумісна щільність розподілу цих випадкових величин. Обчислення  $J_{\text{КЦ}}$  згідно з (2) – це досить складна задача. Тому на практиці замість точного значення  $J_{\text{КЦ}}$  пропонується використовувати оцінку його нижньої границі.

Для аналізу ступеня технологічної стійкості режиму роботи КЦ при повному відключенні КЦ від магістралі (режим “нитка на прохід”) запропоновано формалізувати критерій як ймовірність того, що випадкове значення тиску на вході КЦ  $P_A$  відповідатиме потрібному значенню тиску на виході КЦ  $P_B$ , який стабілізується засобами локальної автоматики із заданою точністю:

$$J_{\text{КЦ}} = P \left[ P_{B \min} \leq \tilde{P}_A \leq P_{B \max} \right] \equiv \int_{P_{B \min}}^{P_{B \max}} f(P_A) dP_A \cdot \quad (3)$$

Також отримані аналітичні вирази для оцінювання критерію ступеня технологічної стійкості режимів роботи багатоцехових КС та ГТС у цілому.

За критерій економічної ефективності режиму роботи КС обрано сумарну витрату паливного газу у грошовому еквіваленті (грн.):

$$J_{2\text{КС}} = 24TG_{\text{КС}}C_{\text{КС}}, \quad (4)$$

де  $G_{KC}$ , кг/год - витрата паливного газу на КС як функція параметрів режиму;  $C_{KC}$ , грн/кг - питома вартість газу, що зростає з віддаленістю КС від місць видобування газу, а  $T$ , доба – інтервал планування.

**Третій розділ** присвячено математичній формалізації задачі оперативного планування режиму роботи ГТС та розробці методу її розв'язання.

Показано, що велика розмірність задачі планування режиму роботи ГТС у класичній постановці не допускає її безпосереднього розв'язання. Тому при її постановці необхідне використання принципу декомпозиції ГТС на локальні підсистеми (ЛП). Це дозволяє значно понизити розмірність та розробити метод розв'язання загальної задачі, що підлягає практичній реалізації.

Запропоновано новий спосіб декомпозиції ГТС на локальні підсистеми з урахуванням наявної системи автоматизованого управління, а також наявності міжсистемних зв'язків на лінійній частині ГТС. При цьому виходи ЛП відповідають виходам КС, де засобами локальної автоматики реалізується стабілізація тиску газу, а лінійна частина ЛП поєднує усі нитки одного МГ або різних МГ, між якими є відкриті перемички. Реалізація цієї методики дозволила суттєво спростити процедуру координації рішень оптимізації ЛП ГТС із складною структурою.

Вперше запропоновано та формалізовано задачу оперативного планування режиму роботи ГТС, що відрізняється від відомих виглядом функції мети та системою обмежень. Така постановка забезпечує отримання рішень, що є оптимальними за сукупністю критеріїв економічної ефективності режиму роботи ГТС та ступеня його технологічної стійкості до прогнозованого рівня зовнішніх збурень, що обумовлені стохастичним характером процесів газоспоживання в ГТС.

У дисертаційній роботі ГТС розглядається як система  $K$  орієнтовано-взаємозв'язаних ЛП з векторними входами та виходами. Кожна  $i$ -а ЛП має  $m_i$  входів та  $d_i$  виходів, оскільки включає лінійну дільницю з  $m_i$  входами та  $e_i$  виходами, що є входами  $e_i$  КЦ, кожен з яких має  $d_{ij}$  виходів,  $\sum_{j=1}^{e_i} d_{ij} = d_i$ . На ЛД  $i$  - і

ЛП є  $v_i$  ГРС, де газ віддається споживачам. Так модель ГТС має  $M < \sum_{i=1}^K m_i$  вхо-

дів,  $D < \sum_{i=1}^K d_i$  виходів,  $E = \sum_{i=1}^K e_i$  КЦ та  $V = \sum_{i=1}^K v_i$  ГРС.

Плановий режим роботи ГТС характеризується вектором змінних стану, кожна з яких – це вектор параметрів потоку газу (витрата, тиск і температура) у точці зв'язку підсистем, тобто на виході КЦ - вході ЛУ:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k+1}, \dots, \mathbf{x}_{k+M}, \mathbf{x}_{k+M+1}, \dots, \mathbf{x}_{k+M+N}), \quad (5)$$

де  $k$  - кількість внутрішніх зв'язків між ЛП ГТС.

Обмеженнями на плановий режим роботи ГТС є:

- вектор об'ємів транзиту газу на виходах ГТС  $\mathbf{q}_{\text{вих}} = (q_{\text{вих}1}, q_{\text{вих}2}, \dots, q_{\text{вих}D})$ ;

- максимальне відхилення обсягів транзиту від контрактних  $\Delta q_{\text{вих}}$ ;

- вектор значень тиску газу на входах ГТС:  $\mathbf{P}_{\text{вх}} = (P_{\text{вх}1}, P_{\text{вх}2}, \dots, P_{\text{вх}M})$ .

Режим газоспоживання на плановому періоді  $[0, T]$  в умовах невизначеності задано вектором  $\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K)$ ,  $\mathbf{w}_i = (\mathbf{m}_{qi}, \boldsymbol{\sigma}_{qi})$ ,  $i = 1, \dots, K$ , де  $\mathbf{w}_i$  - вектор умовних математичних сподівань та дисперсій (прогнозів на період  $[0, T]$ ) обсягів газоспоживання на кожній з  $v_i$  ГРС  $i$ -ї підсистеми:

$$\mathbf{m}_{qi} = (m_{qi1}, m_{qi2}, \dots, m_{qiv_i}), \quad \boldsymbol{\sigma}_{qi} = (\sigma_{qi1}, \sigma_{qi2}, \dots, \sigma_{qiv_i}).$$

Детермінований вектор управління визначено як

$$\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K), \quad \mathbf{u}_i = (\mathbf{s}_i, \mathbf{n}_i), \quad (6)$$

де  $\mathbf{s}_i$  - вектор, що відповідає структурі цехів  $i$ -ї ЛП,  $i = 1, \dots, K$ , а  $\mathbf{n}_i$  - вектор параметрів режиму роботи ЛП - частоти обертання валів ЦБН ГПА цих КЦ.

Режим  $i$ -ї ЛП характеризується векторним критерієм оптимальності  $\mathbf{r}_i$ :

$$\mathbf{r}_i = (J_{1i}, J_{2i}), \quad i = 1, \dots, K. \quad (7)$$

Розв'язанню задачі структурної і параметричної оптимізації  $i$ -ї ЛП формально відповідає пошук  $\mathbf{u}_i$  та  $r_i$  при заданих  $\mathbf{x}_i$ ,  $\tilde{\mathbf{x}}_i$  та  $\mathbf{w}_i$ :

$$\mathbf{u}_i = U_i(\mathbf{x}_i, \tilde{\mathbf{x}}_i, \mathbf{w}_i), \quad \mathbf{x}_i = (\mathbf{x}_{i1}, \mathbf{x}_{i2}, \dots, \mathbf{x}_{im_i}), \quad \tilde{\mathbf{x}}_i = (\tilde{\mathbf{x}}_{i1}, \tilde{\mathbf{x}}_{i2}, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_{im_i}), \quad (8)$$

де  $\mathbf{x}_{ij}$  - вектор параметрів стану на  $j$ -му вході, а  $\tilde{\mathbf{x}}_{ij}$  - на  $j$ -му виході  $i$ -ї ЛП,  $i = 1, \dots, K$ . Явний вигляд кожної з функцій  $U_i$  визначається згідно з структурою ЛП, математичними моделями ЛД і КС, а також формулами для  $J_1, J_2$ .

У дисертаційній роботі для постановки задачі оптимального планування режиму ГТС за сукупністю критеріїв  $J_1(\mathbf{s})$  та  $J_2(\mathbf{u})$  використовується модифікований метод уступок для критеріїв, що лексикографічно упорядковані:

$$\begin{aligned} S_{\Delta} &= \mathbf{s}_j \in \Omega: |J_1(\mathbf{s}_j) - J_1^*| \leq \Delta, \\ J_1^* &= \max_{\mathbf{s} \in \Omega} J_1(\mathbf{s}). \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\Omega$  - це область допустимих рішень, що визначається обмеженнями на змінні стану моделі ГТС: системами лінійних і нелінійних алгебраїчних рівнянь, обмеженнями та граничними умовами математичних моделей ЛД МГ, ГПА, КЦ та КС.

Задачу оптимального планування режиму ГТС подано як задачу мінімізації функціонала  $J_2(\mathbf{u})$  по  $\mathbf{s}$  на множині  $S_{\Delta}$  при значеннях вектора параметрів системи  $\mathbf{n}$ , що належать області  $\Omega$ :

$$J_2(\mathbf{u}) \rightarrow \min_{\mathbf{s} \in S_\Delta, \mathbf{n} \in \Omega} . \quad (10)$$

Задача (10) відноситься до класу задач нелінійного математичного програмування дискретно-безперервного типу високої розмірності з нелінійними обмеженнями у вигляді систем рівнянь і систем двох- та односторонніх нерівностей.

У дисертаційній роботі розв'язання задачі (10) виконується шляхом координації розв'язків задач оптимізації кожної ЛП. Проблему координації формалізовано як задачу багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою та векторними змінними стану та рішень, а метод її розв'язання розроблено на підставі методу динамічного програмування. Запропоновано алгоритми оптимізації лінійних одновимірних і багатовимірних систем, базовими співвідношеннями яких є (11) – (16). Розроблено спосіб оптимізації систем із деревоподібною структурою.

Запропоновано загальну методику розв'язання задачі оптимізації локальної підсистеми ГТС.

Удосконалено методи структурної та параметричної оптимізації режимів роботи КЦ і багатоцехових КС з урахуванням апріорної невизначеності умов їхнього функціонування. Показано, що оптимальну структуру КС можна визначити як

$$\mathbf{s}^* = \arg \max_{\mathbf{s} \in S_d} J_1(\mathbf{s}), \quad S_d = \{ \mathbf{s} : m_{q^-}(\mathbf{s}) \leq m_q \leq m_{q^+}(\mathbf{s}) \}, \quad (17)$$

де  $S_d$  - множина структур, за яких найвірогідніше буде забезпечена необхідна продуктивність КС. Задача параметричної оптимізації КС формалізована як

$$J_2(\mathbf{s}^*) = 24TC_{KC} G_{KC}(\mathbf{s}^*, \mathbf{q}) = 24TC_{KC} \sum_{i=1}^{N_{KC}} s_i^* G_i(\mathbf{q}) \rightarrow \min_{\mathbf{q} \in \Omega_q}, \quad (18)$$

$$\Omega_q : q_i^- (\mathbf{q}) \leq q_i \leq q_i^+ (\mathbf{q}); \quad m_{q_{KC}} = \sum_{i=1}^{N_{KC}} q_i = \text{const}. \quad (19)$$

Обчислення  $G_{KC}(\mathbf{s}^*, \mathbf{q}^*)$  здійснюється шляхом розв'язання системи:

$$G_i(\mathbf{q}) = g_i(\varphi_1(\mathbf{q}), \varphi_2(\mathbf{q}), P_a, T_a, n_i), \quad q_i = g_i(\varphi_1(\mathbf{q}), \varphi_2(\mathbf{q}), \varphi_3(\mathbf{q}), n_i), \quad i = 1, \dots, N_{KC}. \quad (20)$$

Задача нелінійного математичного програмування (18) - (19) розв'язується комплексним методом Бокса, модифікованим для врахування особливостей задання обмежень (19). Параметрична оптимізація КЦ виконується аналогічно.

Аналіз результатів досліджень властивостей оптимальних вирішень, що отримуються, дозволив сформулювати декілька практично важливих висновків. Так для КЦ, який містить однотипні ГПА, чії енергетичні характеристики розрізняються не більше, ніж на 10%, замість оптимального вирішення задачі розподілення навантаження між ГПА пропонується використовувати наближене вирі-

шення - рівномірне розподілення навантаження між ГПА. Показано, що непродуктивні витрати паливного газу при цьому зростають не більше, ніж на 0.2 ~ 0.8%. Але оптимальне розподілення навантаження між КЦ КС може дати настільки значний ефект економії паливного газу (до 15 ~ 20%), що слід рекомендувати розв'язання цієї задачі як обов'язкову функцію диспетчера КС та ЛВУ.

У **четвертому розділі** проведено дослідження властивостей розв'язків задачі планування режимів роботи ГТС в умовах невизначеності газоспоживання.

На прикладі типової ГТС показано, що оптимальне планування є необхідною умовою практичної реалізації ресурсозберігаючих і технологічно стійких методів управління автоматизованою ГТС. Діапазон зміни характеристик планових режимів при заданих граничних умовах може складати до 100% за показником якості та до 35% - за показником ефективності.

Результати імітаційного моделювання підтвердили працездатність та ефективність розробленої методики розв'язання задачі оперативного планування, а також технологічну стійкість оптимальних режимів, що отримуються.

Показано, що застосування розробленого методу оптимізації режимів роботи ГТС дозволяє досліджувати границі областей згоди і області Парето за критеріями якості та ефективності. Встановлено, що залежності характеристик оптимальних режимів при варіаціях граничних умов є кусково-безперервними та багатоекстремальними, оскільки вони визначені на дискретних структурах КС та на дискретних множинах допустимих значень тиску на виходах КС. Визначено, що ОДР ГТС є сукупністю незв'язаних областей досить складної структури, визначати які слід для кожної ГТС при конкретних значеннях граничних умов.

Результати чисельного аналізу переконливо підтвердили неприйнятність застосування в практиці диспетчерського управління вирішень задачі планування, отриманих без урахування фактора невизначеності газоспоживання.

З аналізу результатів проведених чисельних експериментів випливає, що ГТС у цілому має запас стійкості до досить малих збурень попутного відбору газу. Чим більше завантаженість ГТС (її продуктивність та тиск), тим більший рівень збурень вдається компенсувати за рахунок оптимального розподілення навантаження між КС ГТС. Обґрунтовано потенціальну можливість отримати суттєве підвищення ступеня технологічної стійкості режиму роботи тільки за рахунок оптимального завдання уставки на температуру газу на виході АВО КС ГТС.

На основі отриманих в дисертації результатів розроблено:

- комплекс алгоритмів та програмних засобів розрахунку режимів роботи ГПА, побудови та відображення областей його допустимих режимів роботи з урахуванням похибок давачів у складі АСЦК Пролетарського ПСГ;

– комплекс програмних засобів розрахунку режимів роботи відцентрового нагнітача та контролю стану проточної частини газотурбінної установки ГПА як складової частини програмного комплексу "Автоматизоване робоче місце змінного інженера" АСУ ТП КС-3 КС "Ромненська" УМГ "Київтрансгаз";

– комплекс алгоритмів та програмних засобів ідентифікації параметрів режиму роботи ГПА та КЦ у складі АРМ ЗІ АСК ТП КС "Тарутине";

– комплекс алгоритмів та програмних засобів розрахунку режимів роботи ГПА та КЦ, контролю стану проточної частини ГТУ, побудови областей допустимих режимів ГПА у складі АРМ ЗІ АСК ТП КЦ №1 КС "Ужгород" як складової частини програмного комплексу "Рубін".

## ВИСНОВКИ

Основний результат роботи полягає у розв'язанні задачі оперативного планування режимів роботи ГТС в умовах невизначеності газоспоживання. У процесі виконання роботи отримано наступні основні результати.

1. Показано, що відомим методам математичного моделювання та оптимізації режимів роботи технологічного обладнання ГТС, які базуються на тезах детермінованого підходу, при їхнього використання в задачах управління ГТС в умовах невизначеності структури та параметрів системи або зовнішніх збурень притаманний ряд суттєвих недоліків, пов'язаних з неприпустимо низьким ступенем стійкості отриманих рішень, тобто їх суттєвою чутливістю до варіацій граничних умов, що не дозволило цим методам отримати практичного використання у системах оперативно-диспетчерського управління ГТС.

2. На основі методів математичного моделювання технологічних об'єктів ГТС запропоновано комплекс моделей цих об'єктів та методик побудови областей допустимих режимів роботи, що враховують апріорну невизначеність умов їхнього функціонування.

3. Запропоновано та формалізовано критерій оцінки ступеня технологічної стійкості режиму роботи технологічного обладнання ГТС та системи у цілому для прогнозованого рівня зовнішніх збурень.

4. Встановлено, що існуючі постановки задачі оперативного планування режиму роботи ГТС майже непридатні для вирішення систем із багатовимірною мережною структурою та найчастіше надають рішення, що майже завжди є нестійкими за умови наявності будь-яких зовнішніх збурень. Для вирішення цих проблем запропонована нова постановка задачі планування та ефективний метод її розв'язання, що засновані на використанні специфічних властивостей існуючої структури ГТС та системи її автоматизованого управління.



5. Запропоновано новий спосіб декомпозиції ГТС на локальні підсистеми з урахуванням наявної системи автоматизованого управління, а також з урахуванням меж системних зв'язків на лінійній частині ГТС, який дозволяє розв'язувати задачу оптимізації режиму роботи ГТС з теоретично як завгодно складною структурою взаємозв'язку локальних підсистем.

6. Розвинуто метод динамічного програмування для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою та векторними змінними стану та рішень, що забезпечило можливість вирішення задачі координації рішень оптимізації ЛП ГТС, структура якої містить гілки, що розходяться і сходяться.

7. Удосконалено методи структурної та параметричної оптимізації КЦ та багатоцехових КС за наявності збурень параметрів потоків газу на їхніх входах та виходах, а за результатами аналізу отриманих з їх допомогою оптимальних рішень встановлені умови доцільності проведення оптимізації на реальних об'єктах у випадках різних режимно-технологічних обставин.

8. Результати чисельного аналізу підтвердили основні теоретичні положення дисертаційної роботи, а також працездатність розробленого методу розв'язання задачі оперативного планування режиму роботи ГТС в умовах невизначеності газоспоживання.

9. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованої підтримки прийняття рішень диспетчерами ГТС щодо розв'язання задачі оперативного планування режиму роботи ГТС, яке водночас є засобом дослідження якісних і кількісних характеристик роботи ГТС за різних умов функціонування.

10. Сформульовано практичні рекомендації щодо реалізації ресурсозберігаючих і технологічно стійких режимів транспорту природного газу в ГТС.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Адаменко А.В., Адаменко В.А., Тевяшева О.А. Идентификация технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков, 1999. - №3. – С.24-30.

Здобувачем формалізована постановка задачі ідентифікації технічного стану відцентрового нагнітача за даними штатних вимірів параметрів режиму роботи.

2. Тевяшева О.А. Стохастический подход к построению области допустимых режимов работы центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 71.- С. 130-138.

Здобувачем розроблено методику побудови області допустимих режимів роботи нагнітача газоперекачувального агрегату з урахуванням похибок прямих вимірів параметрів газових потоків на його вході та виході.

3. Тевяшева О.А. Применение метода квадратичной аппроксимации к построению области допустимых режимов работы центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Дн-ск: ПГАСиА, 2001 – № 14. – С.72-76.

Здобувачем запропоновано та реалізовано використання поліноміальної математичної моделі відцентрового нагнітача з метою більш ефективного розв'язання задачі побудови його області допустимих режимів роботи.

4. Прищеп А., Питиримов А., Коток В., Сендеров О., Тевяшева О. Применение современных методов повышения точности и достоверности результатов расчета режимно-технологических параметров работы компрессорного цеха // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. - Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2002. - №452. – С.35 - 39.

Здобувачем обґрунтована необхідність урахування похибок прямих вимірів при встановленні точності непрямих вимірів та запропонована формальна процедура розв'язання цієї задачі.

5. Галуза А.А., Любчик Л.М., Тевяшева О.А. Многокритериальная пошаговая оптимизация многоэтапных систем сетевой структуры // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков, 2004. - №1. – С. 147 - 150.

Здобувачем розроблено метод розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою та векторними змінними стану та рішень на основі методу динамічного програмування.

6. Тевяшева О.А. Стохастический подход к решению задач контроля и управления газоперекачивающими агрегатами в реальном времени // Тр. Міжнар. конф. “Автоматика - 2000”. – Львів, 2000. – С.221-228.

Здобувачем у загальному вигляді формалізована задача контролю та управління режиму роботи газоперекачувальними агрегатами.

7. Адаменко А.В., Адаменко В.А., Тевяшева О.А. Идентификация технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов по минимальному объему оперативных данных // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини. – Вип. 6. – 1999. – С. 314-317.

Здобувачем запропоновано модифікацію постановки та розв'язання задачі ідентифікації технічного стану відцентрового нагнітача за наявності мінімального набору штатних вимірів режимно-технологічних параметрів.

8. Деклараційний патент України на винахід, №57577А, Спосіб побудови області допустимих режимів роботи газоперекачувального агрегату. / Соляник В.Г., Колодяжний В.В., Сорокін О.О., Хохлаков М.В., Дістрянов С.В., Коток В.Б., Тевяшева О.А. - №2002097246; Заявл. 06.09.02; Опубл. 16.06.03, Бюл. №6. F04D27/00. – 18 с.: іл.

Здобувачем проведено порівняльний аналіз існуючих способів побудови області допустимих режимів роботи газоперекачувального агрегату, виявлено їхні переваги та недоліки.

### АНОТАЦІЯ

Тевяшева О.А. Оперативне планування режимів роботи автоматизованої газотранспортної системи в умовах невизначеності газоспоживання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004.

У роботі вирішено науково-практичну задачу оперативного планування режимів роботи газотранспортної системи (ГТС) в умовах невизначеності газоспоживання. Запропоновано комплекс математичних моделей технологічних об'єктів ГТС, що враховують апріорну невизначеність умов їхнього функціонування. Формалізовано критерій оцінки ступеня технологічної стійкості режиму роботи ГТС для прогнозованого рівня зовнішніх збурень. Запропонована нова постановка задачі оперативного планування та ефективний спосіб її розв'язання, заснований на використанні специфічних властивостей структури ГТС та існуючої системи її автоматизованого управління. Розроблено методику розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації багатовимірних систем із мережною структурою та векторними змінними стану та рішень. Удосконалено методи структурної та параметричної оптимізації КЦ та багатоцехових КС за наявності збурень параметрів потоків газу на їхніх входах та виходах. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованої підтримки рішень диспетчера ГТС щодо реалізації ресурсозберігаючих і технологічно стійких режимів транспорту та розподілення природного газу в ГТС.

**Ключові слова:** газотранспортна система, оперативне планування, багатокритеріальна оптимізація, невизначеність, технологічна стійкість.

### АННОТАЦИЯ

**Тевяшева О.А.** *Оперативное планирование режима работы автоматизированной газотранспортной системы в условиях неопределенности газопотребления.* – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2004.

В работе формализована и решена задача оперативного планирования режимов работы автоматизированной газотранспортной системы (ГТС) в условиях неопределенности газопотребления.

Разработан комплекс математических моделей и методик построения областей допустимых режимов работы технологических объектов ГТС с учетом априорной неопределенности условий их функционирования. Предложен и формализован критерий оценки степени технологической устойчивости режима работы технологического оборудования ГТС и системы в целом для прогнозируемого уровня внешних возмущений.

Установлено, что существующие постановки задачи оперативного планирования режимов работы ГТС практически неприменимы для систем с многомерной сетевой структурой и, кроме того, дают решения, которые почти всегда оказываются неустойчивыми при наличии каких-либо внешних или внутренних возмущений. Предложена новая постановка задачи планирования и эффективный метод ее решения, основанные на использовании специфических свойств структуры ГТС и особенностей ее системы автоматизированного управления.

Получил развитие метод динамического программирования для решения задачи многокритериальной оптимизации многомерных систем с сетевой структурой и векторными переменными состояния и решения, что обеспечило возможность решения задачи координации решений локальных подсистем ГТС с древовидной структурой любого уровня сложности.

Усовершенствованы методы структурной и параметрической оптимизации КЦ и многоцеховых КС при наличии возмущений параметров потоков газа на их входах и выходах. В результате анализа полученных с их помощью оптимальных решений определены условия целесообразности проведения оптимизации на реальных объектах при различных режимных технологических условиях.

Результаты численного анализа подтвердили основные теоретические положения диссертационной работы, а также позволили сформулировать важные практические рекомендации по реализации ресурсосберегающих и технологически устойчивых режимов транспорта природного газа в ГТС.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизированной поддержки принятия решений диспетчером ГТС при анализе технологических процессов в ГТС и при формировании диспетчерского графика, соответствующего оптимальному плановому режиму работы ГТС.

**Ключевые слова:** газотранспортная система, оперативное планирование, многокритериальная оптимизация, неопределенность, технологическая устойчивость.

#### ABSTRACT

**Tevjasheva O.A.** *Operational planning of automatized gas-transport system's operating modes under gas-consuming uncertainty conditions* – Manuscript.

Thesis for candidate's degree by specialty 05.13.07 – Technological Processes Automation. National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv, 2004.

In the dissertation, the problem of operational planning of gas-transport system (GTS) operating modes under gas-consuming uncertainty is solved. A complex of mathematical models of GTS technological objects, that take into account *a priori* functioning conditions uncertainty, is proposed. A new criteria of technological stability degree of GTS operating modes is formalized for predicted level of external disturbances. The problem statement of operational planning task and the method of its solving, based on using of particular qualities of structure GTS automatized control system, are proposed. The method of solving the multicriterion optimization problem for multidimensional systems with woody structure, vector state and decision variables is developed. Methods of structural and parametric optimization for compressor stations are improved in condition for input and output gas flows disturbed. Algorithms and software for the decision-making process support for GTS dispatcher are developed. It enables planning and implementing resource-saving and technological stable modes of gas transport and distribution in GTS.

**Keywords:** gas-transport system, operational planning, multicriterion optimization, uncertainty, technological stability.