

# Оптимальне Планування Режимів Роботи Складних Газотранспортних Систем

Назар Притула, Мирослав Притула  
Відд. розробки систем опт. план. та прогн. режимів  
роботи газотранспортної системи  
Філія «Науково-дослідний інститут транспорту газу»  
ПАТ «УКРТРАНСГАЗ»  
Харків, Україна  
nazar.prytula1@gmail.com, myroslav.prytula@gmail.com

Вадим Фролов  
Центр. диспетчерський департамент  
ПАТ «УКРТРАНСГАЗ»  
Київ, Україна  
frolov-va@utg.ua

## Optimal scheduling operating modes of gas transmission systems with complicated structure

Nazar Prytula, Myroslav Prytula  
Dept. for development of systems of optimal scheduling and  
forecasting operating modes of the gas transmission system  
Research and Design Institute of Gas Transmission PJSC  
Ukrtransgas  
Kharkiv, Ukraine  
nazar.prytula1@gmail.com, myroslav.prytula@gmail.com

Vadym Frolov  
Central dispatching department  
PJSC Ukrtransgas  
Kyiv, Ukraine  
frolov-va@utg.ua

**Анотація**—В роботі приведені змістовні постановки задач оптимального планування режимів роботи складних газотранспортних систем, моделями яких є системи нелінійних рівнянь з різнотипним математичним представленням. Запропоновані стійкі методи розв'язування таких системи за час, які забезпечили розв'язування оптимізаційних задач. Приведені результати апробації розробленого програмного забезпечення на реальних даних, які продемонстрували ефективність розробленого алгоритмічного забезпечення.

**Abstract**—This work contains the problem statements of optimal optimal scheduling operating modes of gas transmission systems with complicated structure models of which have systems of nonlinear equations with different types of mathematical representation. Proposed stable methods for solving such systems, which provided solving optimization problems. There are the results of testing the developed software on real data that demonstrated the efficacy of the developed algorithmic software.

**Ключові слова**—Газотранспортна система; оптимальний режим роботи; алгоритми оптимізації; програмний комплекс; компресорна станція.

**Keywords**—gas transmission system; optimal operating mode; optimization algorithm; software; compressor station.

### I. Вступ

У роботі розвиваються методи теорії гідравлічних мереж з активними об'єктами, які використовуються для оптимізації розподілу потоків газу в системі трубопроводів – газотранспортних системах (ГТС). ГТС представляються у вигляді графів без петель, ребрами якого є технологічні об'єкти які володіють протяжністю, тобто мають вхід та вихід, а вершинами – точки їх з'єднання. Початковими чи крайовими умовами для розрахунку є значення тисків та витрати газу на входах та виходах системи. В теорії гідравлічних мереж розвиваються два основних методи гідравлічного розрахунку ГТС – метод вузлових потенціалів і метод контурних витрат [1]. Метод вузлових потенціалів передбачає побудову для графу ГТС системи рівнянь, невідомими в яких є значення тисків у всіх вузлах. Рівняння будують виходячи із необхідності виконання у всіх вузлах графу законів Кірхгофа. Він має обмежену сферу використання, так як в умовах існування об'єктів із суттєво різними пропускними здатностями, проявляються проблеми щодо його коректного використання.

Метод контурних витрат, невідомими в яких є витрата газу по контурах графу, ґрунтується на забезпеченні виконання одночасно обох законів Кірхгофа. Швидкість збіжності методу залежить від алгоритму виділення дерева

– остова в графі ГТС, який містить обов'язково вузол із заданим тиском. Таке виділення остова диктує однозначний початковий розподіл потоків газу. Він дозволяє суттєво скоротити число невідомих в системі, що приводить до зменшення обчислювальних затрат. Розрахунок лінійних та деревовидних структур проходить за одну ітерацію. В доступній літературі пропонуються методи розв'язування систем нелінійних контурних рівнянь Ньютонівського типу – градієнтні методи [2]. Цей тип методів є чутливим до точності початкового наближення. В [3] було запропоновано метод неградієнтного типу, який забезпечив гарантовану збіжність процесу розв'язування задачі за умови коректної її постановки. Важливим є те, що розроблений метод не ставить особливих вимог стосовно початкового наближення та розмірності системи рівнянь.

Розрахунок та оптимізація усталених режимів роботи ГТС використовується для планування та замовлення затратних ресурсів, зокрема енергетичних, так і формування керуючих дій для переходу із поточного в прогнозований оптимальний режим. Керування перехідними процесами забезпечуються системами оптимального керування функціонуванням систем транспортування газу.

Пошук оптимального режиму є надзвичайно складною задачею. Це пов'язано з тим, що оптимальний режим для всієї системи не завжди забезпечується локально оптимальними режимами активних об'єктів та підсистем ГТС. Для ГТС, в реальних умовах неповної завантаженості, виникають проблеми вибору як активних об'єктів, які необхідно задіяти в режимі, так і встановлення їх потужності. Для ГТС України, яка включає 72 КС, 110 цехів, 702 ГПА, серед яких біля 30 різних типів – з газотурбінними, електричними та газомоторними приводами, побудувати оптимальний режим перебірними методами є неможливо. Більше того формування оптимального режиму включає ще вибір точок входу та розподіл між ними прогнозованих об'ємів транзитних та імпортних потоків газу.

Діючі методи, які б знайшли застосування в промислових системах планування розподілу потоків мережевого типу з компресорними станціями – активними об'єктами, з газопроводами із різним номінальним тиском газу в них в літературі є відсутніми [4]. Такі методи розроблялися для газотранспортних систем з простою технологічною схемою – одно- та багатониткових магістральних газопроводів. Оптимізація в одноступінчастих системах магістральних газопроводів в основному проводиться способом вибору тиску близького до максимальних на виходах активних об'єктів. В загальному випадку, в умовах існування непроективних режимів, наявність в системі автоматичних систем підтримки заданих тисків та витрати, методи планування суттєво ускладнюються.

## II. ГАЗОТРАНСПОРТНА СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ ПЛАНУВАННЯ

Всі об'єкти, які приймають участь в транспортуванні та зберіганні газу – технологічні об'єкти, об'єднані в єдиний технологічний процес трубопроводами з довжинами від

кількох метрів до ста і більше кілометрів та діаметрами які мають від 100 до 1420 мм. Більшість ділянок газопроводів прокладені на певній глибині, а незначна частина проходять над поверхнею землі. Внутрішня поверхня трубопроводів є шершавою, а зовнішня поверхня труби теплопровідною (іде теплообмін із зовнішнім середовищем). Рельєф траси прокладання трубопроводів є змінним і на десятках кілометрів може мінятися до 800 і більше метрів. Робочий тиск в трубах доходить до 7.5 МПа. Компресорна станція (КС) може складатися із декількох цехів. Досить часто цехи відрізняються типом газоперекачуючих агрегатів (ГПА), як за потужністю (від 4.0 до 27.0 МВт) так і типом приводу (електропривід, газотурбінна установка) для відцентрового нагнітача. На багатьох підземних газосховищах працюють компресори поршневого типу. Технологічні схеми окремих КС можуть забезпечити її роботу в дві – три ступені. На ГТС є присутніми велика кількість різнотипної запірної та регулюючої арматури. Частина із них оснащена приводами для їх відкриття та закриття. Робота запірної арматури може моделюватися зміною площі поперечного перетину трубопроводу в зоні їх установки.

Вибір і підтримка найбільш раціонального вихідного режиму газотранспортної системи, при існуючій схемі взаємодії централізованої і розподіленої схеми керування та при наявності стійких відхилень фактичних значень параметрів від заданих розрахункових може здійснюватися способом корекції режиму роботи системи магістральних газопроводів. Результати корекції режиму верхнього рівня є вихідними даними для розрахунку режиму роботи окремих технологічних об'єктів.

Структура системи планування режимів роботи ГТС та його об'єктів включає підсистеми: актуалізації технологічних схем та даних; прогнозування та формування вхідних даних; ідентифікації параметрів моделей; розрахунку інтегральних параметрів режиму; пошуку оптимального розв'язку та представлення результатів моделювання.

Складність ідентифікації параметрів моделей та стану об'єктів пов'язаний із значним рівнем невизначеності режимної інформації, яка, в основному, проявляється у відсутності замірів витрат, тисків і температур в багатьох вузлах газотранспортної системи. Проведений аналіз видів невизначеностей, характерних для процесу управління складними системами, якими є газотранспортні системи, показав: низьку точність і неповноту оперативної інформації яка породжується значною похибкою вимірювання, ненадійною і малопродуктивною системою передачі даних, асинхронністю вимірювання і поступлення, недоступністю до частини інформації тощо. Крім цього неточність моделей пов'язана із допущенням про однорідність певних підсистем, спрощенням, яке пов'язане з неврахуванням в повній мірі рельєфу прокладання трубопроводів введення нечітких моделей типу термогідрравлічних еквівалентів, неврахування в повній мірі суттєвої не лінійності та часткового використання паспортних характеристик, тощо).

Розроблені програмні інструменти забезпечують ідентифікацію термогідрравлічних параметрів ділянок газопроводів, параметрів ГПА – приводу та ВН, параметрів пластів – колекторів, фільтраційних опорів при вибійних зон свердловин, параметрів запірної та регулюючої арматури [5].

### III. ЗМІСТОВНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Задача оптимізації режиму функціонування ГТС ставиться як задача мінімізації цільової функції [6]. Найбільш природнім є критерій мінімізації енерговитрат. Якщо б всі ГПА були оснащені газотурбінними приводами, то критерієм була би мінімізація паливного газу. У випадку однакового к.к.д. у ГПА, то слід очікувати, що витрата паливного газу досягне свого мінімуму при мінімізації сумарної потужності задіяних в режимі ГПА.

Ускладнюють задачу оптимізації наявність в ГТС різних типів приводів – газотурбінні та електричні. Фінансові витрати на паливний газ та електроенергію для забезпечення одиниці потужності таких ГПА є різними та й суттєво вони різняться своїм к.к.д. Нерівномірним є і їх розміщення по системі магістральних газопроводів. Для задач оперативного оптимального планування часто вимагається наявність в певних підсистемах ГТС чи окремих ділянках магістральних газопроводів заданого об'єму акумульованого газу. Це пов'язано з тим, що поточний та прогнозований режим на декілька годин вперед за об'ємами акумульованого газу та його розподілом в системі, в основному, суттєво не різняться. Додатково умовою для оптимізаційних задач часто служить вимога на формування стійких режимів та умов на перехідні режими – з поточного в прогнозований. До таких умов часто відносять умову на мінімальну кількість переключення силового обладнання на КС. Стійкість режимів ГТС пов'язана із стійкістю роботи окремих ГПА КС і вона оцінюється як за віддаленістю від помпажної зони робочих точок відцентрових нагнітачів так і за запасом по потужності приводів ГПА.

При постановці оптимізаційних задач режими роботи КС вважаються невідомими і для відомої витрати газу по магістральному газопроводі вони представляються як функції тиску на їх входах та виходах. В більш складних випадках режим роботи КС є також і функцією витрати газу.

На всіх входах та виходах системи транспортування газу задаються значення витрати газу і в одній із точок – тиск. Бажано, щоб з певною точністю виконувався і баланс газу – надходження в систему було рівним витокам із системи. На входах та виходах системи задаються, як обмеження, інтервали тисків, частина з яких визначаються контрактними умовами. Можливе задання обмежень на тиски на всіх, або окремих ребрах графу. На ребрах типу КС існують обмеження на тиски - мінімальні на входах та максимальні на виходах. Додатковими обмеженнями на КС можуть бути інтервали зміни внутрішньої потужності газоперекачуючих агрегатів та ступеня стиску газу.

Планування режимів роботи ГТС ґрунтується на певному прогнозі. Точність прогнозу пов'язана з його

часовим періодом. Слід очікувати на задовільну точність при плануванні режимів в межах однієї, або декількох діб. При плануванні сезонних режимів користуються середніми прогнозними параметрами, часто і минулорічними. Такі режими формують, як правило, в оптимізаційній постановці.

### IV. ПЛАНУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ

Практично всі традиційні методи оптимізації неможливо використати чи їх модифікувати для розв'язування сформульованої задачі. Це пов'язано з тим, що параметри функціонування КС мають як дискретні так і неперервні області складної форми які не є наперед фіксованими, а встановлюються на етапі розрахунку параметрів розподілу потоків по системі магістральних газопроводів. І тому забезпечити в процесі ітераційного процесу належність оптимальних параметрів роботи КС робочій області приводів та відцентрових нагнітачів є досить складно.

До системи планування режимів поставлені певні вимоги. Вона повинна забезпечити: планування прогнозованих режимів за заданими критеріями та із врахуванням наявності заданих об'ємів акумульованого газу та його розподілу в системі, високий рівень автоматизації процесу планування, врахування всіх наявних технологічних обмежень, в максимальній мірі врахування вимог диспетчера щодо топології ГТС, надання переваг певному типу технологічного обладнання для включення їх в процес експлуатації тощо.

Питання існування та єдиності розв'язку задач планування режимів для ГТС з компресорними станціями в повній мірі не є розв'язаними. Приведемо деякі необхідні умови існування розв'язку задач. Однією із необхідних умов існування розв'язку системи нелінійних рівнянь буде одна із вказаних нижче.

В кожній зв'язній компоненті граф-схеми ГТС, знайдеться тільки одна вершина, крім вершин які були вершинами входами і виходами КС, в якій є заданим абсолютне значення тиску.

З довільної вершини контуру існує шлях до вершини з абсолютним значенням тиску.

Для довільних двох вершин зв'язної компоненти знайдеться вершина яка належить одному із можливих шляхів між ними з абсолютним значенням тиску.

Підходи до оптимізації ГТС суттєво залежать від структури його підсистем і системи в цілому. Слід виділити такі основні типові підсистеми: КС з однотипними та різнотипними КС, лінійні і дерево видні ГТС, ГТС довільної структури.

Слід зазначити, що автоматизація процесу вибору оптимальної топології ГТС, як математична задача, в повній мірі для такої складної системи як ГТС України, є ще розв'язаною в неповній мірі. Вона добре автоматизується для багато ниткових газопроводів з мінімальним перебором варіантів, якщо попередньо проведено дослідження області оптимальності їх роботи.

Відомо, що для ГТС без активних об'єктів при коректній постановці задачі існує єдиність розв'язку, а початковий розподіл впливає тільки на швидкість збіжності методу. В умовах існування ГТС з активними об'єктами розрахунок режимів для різних початкових розподілів приводить до різних параметрів потоків і, відповідно, до різних паливно-енергетичних затрат. З точки зору оптимізації ГТС початковий розподіл грає важливу роль. На даний час не існує рекомендацій для ГТС із складною технологічною схемою щодо побудови оптимального початкового розподілу потоків і тому без організації переборів в таких випадках не обійтися. Задача полягає тільки в їх мінімізації.

Розв'язування оптимізаційних задач дискретними методами цільового перебору вимагають обмеження на критерій оптимальності – виконання властивості адитивності цільової функції. В цьому випадку можна суттєво зменшити складність перебірних методів. Для зменшення переборів та побудови швидких методів пошуку оптимальних режимів запропоновано декілька підходів. У всіх підходах вимагається представлення структури ГТС (рис.1) як об'єднання більш простих структур (рис.2). Для простих лінійних структур розроблені швидкі перебірні алгоритми побудови оптимального режиму (рис.3). Наступний крок – узгодження режимів простих структур, який також вимагає певного перебору варіантів. Чим простіші структури є в основі представлення графу ГТС тим більше переборів прийдеться провести для узгодження їх режимів. Тому розроблені швидкі методи оптимізації більш складних структур - деревовидних та променевих. Для більш швидкого розрахунку простих структур запропоновано так званий «ощадливий» алгоритм, який використовує певні знання фізики роботи систем з активними об'єктами, які суттєво зменшують складність алгоритмів. Різні підходи дають можливість оцінити якість результату оптимізації.

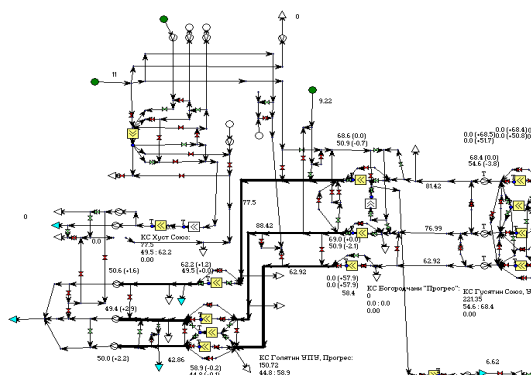


Рис. 1. Фрагмент технологічної схеми

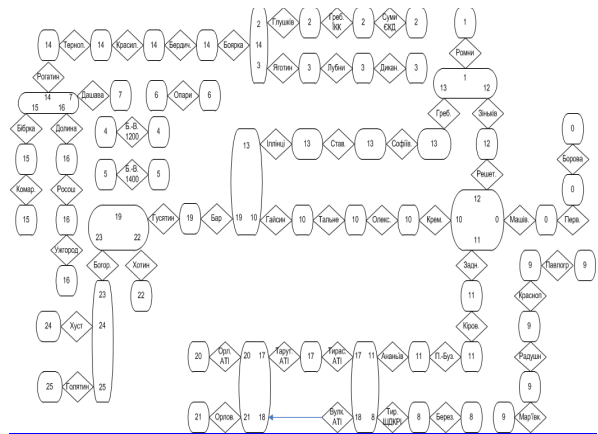


Рис. 2. Представлення технологічної схеми для розрахунку оптимального режиму

## V. ВИСНОВКИ

Система актуалізація даних разом з системою знаходження оптимальних режимів роботи основних об'єктів ГТС та системи загалом забезпечила максимальну автоматизацію процесу розв'язування оптимізаційних задач з мінімальним втручанням користувача. Розроблений програмний комплекс дає можливість редагувати існуючі сценарії роботи ГТС, створювати нові та проводити аналіз сценаріїв, які були сформовані іншими користувачами. Дана розробка забезпечить ефективне розв'язання задач формування оптимальних параметрів керування газотранспортною системою.

Як показали проведені числові експерименти, що одночасне забезпечення в системі умови на завантаження на максимальну продуктивність перших по ходу руху газу КС та мінімізація їх кількості може привести до оптимальності режиму. Підтримка максимально можливого тиску в системі у весняно-літній період вимагає використання незначних об'ємів активного газу газосховищ, який є завжди в наявності, і цей потенціал оптимізації на даний час використовується не в повній мірі. У зимовий період зовсім не використовується потенціал оптимізації, який забезпечується в процесі керування тепловим режимом транспортування газу.

## ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] А. П. Меренков, В. А. Хасилев, Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1965.
- [2] А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев, Оперативное управление потоком-распределением в инженерных сетях. Харьков: Вища школа, 1980.
- [3] Н. Притула, "Розрахунок параметрів потокорозподілу в газотранспортній системі (стаціонарний випадок)", *Фіз.-мат. мод. та інформ. техн.*, вип. 5, С. 146–157, 2007.
- [4] В. С. Кулик, "Алгоритм оптимізації транспорту газу через розветвленну ГТС", *Труб. транспорт: теорія і практика*, № 2, С. 22–25, 2014.
- [5] С. Гладун, Н. Притула, Б. Землянський, О. Химко, "Розрахунок гідродинамічних параметрів стану об'єктів транспорту газу", *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Комп. науки та інформ. техн.*, № 629, С. 174–201, 2008.
- [6] І. Боярин, Р. Боровий, О. Гринів, Н. Притула, В. Ямнич, "Оптимізація роботи багатоцехових компресорних станцій з різнотипними газоперекачуючими агрегатами", *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Комп. науки та інформ. техн.*, № 672, С. 326–335, 2010.