

© **М.П. Андрішин**  
канд. техн. наук  
Метрологічний центр  
Національна акціонерна  
компанія «Нафтогаз України»

## Баланс газу в газотранспортній системі

УДК (681.3.06÷681.518.54):622.276

*Розроблено універсальний алгоритм виявлення ознак корекції вимірювання витрати газу у магістральному газопроводі, що базується на статистичному аналізі випадкових часових рядів добового вимірювання надходження і розподілу газу.*

**Ключові слова:** магістральний газопровід, баланс газу у газотранспортній системі, методика визначення обсягів витрат природного газу, статистичний аналіз, перетворення Фур'є.

*Разработан универсальный алгоритм обнаружения признаков корректируемого измерения расхода газа в магистральном газопроводе, построенный на статистическом анализе случайных временных рядов суточного измерения прихода и распределения газа.*

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, баланс газа в газотранспортной системе, методика определения объемов расходов природного газа, статистический анализ, преобразование Фурье.

*An universal algorithm for detecting the sings of adjustable measurement of gas flow in the gas main was developed on the basis of the statistic analysis of random time series of daily measurement of gas receipt and distribution.*

**Key words:** main, gas balance, in gas transmission system, methodology of calculation of natural gas flow, statistic analysis, Fourier transform.

Газотранспортна система України (ГТС) являє собою унікальний інженерно-технологічний комплекс, який має такі функції:

- трубопровідне транспортування газу;
- відпуск газу споживачам через газорозподільні станції;
- підземне зберігання газу;
- балансування газотранспортними потоками.

Ефективне виконання цих функцій залежить від ефективності управління газотранспортною системою та її технічного стану.

У статті розглянуто задачу формування балансу газу в газотранспортній системі замкнутого циклу, баланс газу якої формується:

на основі замірів обсягів газу, що надходить до газотранспортної системи ( $X(t_i)$ ) із-за меж України ( $Q_{нз}(t_i)$ ), власного видобутку ( $Q_{нв}(t_i)$ ), підземних сховищ ( $Q_{нпс}(t_i)$ ) та розподілу ( $Y(t_i)$ ) для власних потреб ( $Q_{вп}(t_i)$ ), переданого за межі України ( $Q_{пз}(t_i)$ ), споживачам ( $Q_{пс}(t_i)$ ), для закачування в підземні сховища ( $Q_{ппс}(t_i)$ );

на основі розрахунків запасу газу в магістральному газопроводі ( $Z(t_i)$ ), зміни запасу газу в газопроводі ( $\alpha(t_i)$ ), втрат, що пов'язані з технологією транспортування газу ( $V_{вт}(t_i)$ ), безповоротних пластових втрат ( $V_{вп}(t_i)$ ).

В ідеальному випадку різниця обсягу газу, який надходить до газотранспортної системи, з одного боку, та передається за її межі, а також використовується на власні

потреби разом із втратами  $D(t_i)$ , із іншого боку, повинна дорівнювати зміні запасу газу в газопроводі:

$$D(t_i) = X(t_i) - Y(t_i) = \alpha(t_i), \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

де  $n$  – кількість днів вимірювань часового ряду надходження та розподілу природного газу;  $t_i$  – час.

При цьому

$$\alpha(t_i) = Z(t_i) - Z(t_{i-1}), \quad (2)$$

де  $Z(t_i)$ ,  $Z(t_{i-1})$  – запас газу в газопроводі в  $i$ -ту і  $(i-1)$  добу вимірювань;

$$X(t_i) = Q_{нз}(t_i) + Q_{нв}(t_i) + Q_{нпс}(t_i); \quad (3)$$

$$Y(t_i) = Q_{вп}(t_i) + Q_{пз}(t_i) + Q_{пс}(t_i) + Q_{ппс}(t_i) + V_{вт}(t_i) + V_{вп}(t_i). \quad (4)$$

Насправді рівняння (1) через ряд факторів не виконується, з'являється додатковий член – «розбаланс» ( $\beta(t_i)$ ):

$$\beta(t_i) = D(t_i) - \alpha(t_i). \quad (5)$$

Метою роботи є вивчення впливу складових балансу природного газу та методів їх отримання (визначення) на величину «розбалансу». Для цього вибрано газотранспортну систему, яка складається з двох незалежних систем, що називаються «транзитною» (ТС) та «внутрішньою» (ВС) системами. Вони є автономними, з незалежними балансами природного газу. Вплив однієї системи на іншу можливий через редуруючий вузол. Але такий випадок не розгля-

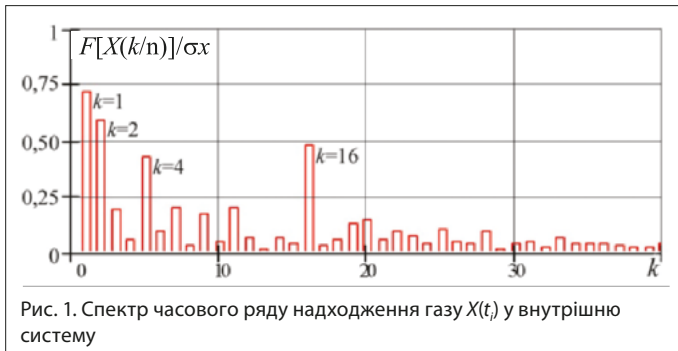


Рис. 1. Спектр часового ряду надходження газу  $X(t)$  у внутрішню систему

дається, оскільки практично не використовується у роботі.

В транзитну систему природний газ надходить через газовимірювальну станцію (ГВС) із Російської Федерації по трьох газопроводах. Робочий тиск системи – 76 ата. Робочі параметри системи підтримують за допомогою восьми компресорних станцій. Газ, що транспортується по транзитній системі, передається внутрішнім споживачам через чотирнадцять газорозподільних станцій (ГРС).

У внутрішню систему природний газ надходить через ГВС із Росії по двох газопроводах та з родовищ України по трьох газопроводах. Внутрішня система включає три підземні сховища природного газу (ПСГ), із яких газ надходить до неї у листопаді – квітні. Робочий тиск системи – 56 ата. Робочі параметри системи підтримують за допомогою дев'яти компресорних станцій. Далі газ передають споживачам через 398 ГРС, закачують до ПСГ (травень – вересень) та передають до третьої системи замкнутого циклу.

Першу спробу аналізу формування балансу природного газу в газотранспортній системі зроблено в роботі [1]. Здійснено аналіз впливу складових балансу та впроваджено програмний продукт для складання балансу. В роботі [2] сформовано складові балансу газу та введено поняття «пряма труба». Вплив складових рівняння (1) на величину «розбалансу» ( $\beta(t_i)$ ) в основному зводився до аналізу роботи та вдосконалення газовимірювальних комплексів на ГВС, вузлів обліку газу на ГРС, ліквідації витоків газу на лінійній частині магістрального газопроводу, кранових вузлах [3–5]. Спеціалісти УкрНДІгазу зробили оцінку величини втрат газу через витокі, спричинені негерметичністю обладнання газотранспортної системи [5]. З цією метою проведено дослідження залежності вібрації в крановому вузлі від величини перетоку [3]. Це дало можливість якісно оцінити величину витікання газу через свічні крани з причини негерметичності перших і других кранів об'язки нагнітачів основних компресорних цехів. У роботі [4] проведено аналіз впливу класу точності приладів обліку природного газу (85–95 %) та точності розрахунку й обліку витрати газу в диспетчерських службах (10–15 %) на величину «розбалансу».

З метою впорядкування підходів розрахунку матеріального балансу газу в ДК «Укртрансгаз» було розроблено методику визначення обсягів витрат при-

родного газу на виробничо-технологічні потреби під час його транспортування газотранспортною системою та експлуатації підземних сховищ газу [6].

Багаторічний аналіз балансу газу у замкненій системі показав, що величина «розбалансу» залежить не тільки від класу точності приладів обліку та точності розрахунків диспетчерських служб, а й від інших факторів роботи газотранспортної системи. З метою їх дослідження побудовано математичну модель визначення впливу складових балансу природного газу на величину «розбалансу» шляхом статистичного аналізу випадкових часових рядів добового вимірювання надходження і розподілу природного газу [7].

Різницю  $D(t_i)$  добового надходження  $X(t_i)$  та розподілу  $Y(t_i)$  природного газу у газотранспортній системі представимо рівнянням (1). Добова зміна запасу газу в газопроводі  $\alpha(t_i)$  описується рівнянням (2). Тоді добовий «розбаланс» природного газу  $\beta(t_i)$  описується рівнянням (5). Нескладно показати, що середньоінтегроване значення зміни запасу газу  $\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$ , дорівнює  $\bar{\alpha} = [Z(t_n) - Z(t_1)]/n \approx 0$ , тобто для того, щоб визначити середньоінтегральне значення добового «розбалансу» за достатньо довгих часових рядів  $n \rightarrow \infty$ , необхідно визначити середню різницю  $\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D(t_i)$ . При цьому дисперсія різниці дорівнює  $\sigma_D^2 = \sigma_\beta^2 + \sigma_\omega^2$ , де  $\sigma_\beta^2$  – дисперсія «розбалансу» та зміни запасу газу в газотранспортній системі [6].

Коефіцієнт кореляції між величинами добового надходження  $X(t_i)$  і добового розподілу  $Y(t_i)$  має вигляд:

$$K(X_i, Y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (X(t_i) - \bar{X})(Y(t_i) - \bar{Y})}{n\sigma_X\sigma_Y},$$

де  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\sigma_X^2$ ,  $\sigma_Y^2$  – середні значення та дисперсії надходження і розподілу природного газу.

Для  $n = 128$  (близько чотирьох місяців), що відповідає величині літнього і зимового періоду, виконується умова:

$$K(X_i, Y_i) \geq K_Y, \quad K(X_i, Y_i) \geq K_Y, \quad (6)$$

де  $K_Y = 0,96$  – еталонне значення коефіцієнта кореляції, що є критерієм фіксації некоригованого визначника  $\bar{D}$  [6]. У цьому випадку щільність імовірності  $D_i$  є Гаусовою щільністю. Коли умова (6) порушується, закон щільності імовірності відрізняється від нормального і нагадує розподіл Райса. Розподіл Райса є композицією Гаусового закону арккосинуса, а часовий сигнал складається з випадкових і періодичних компонент.

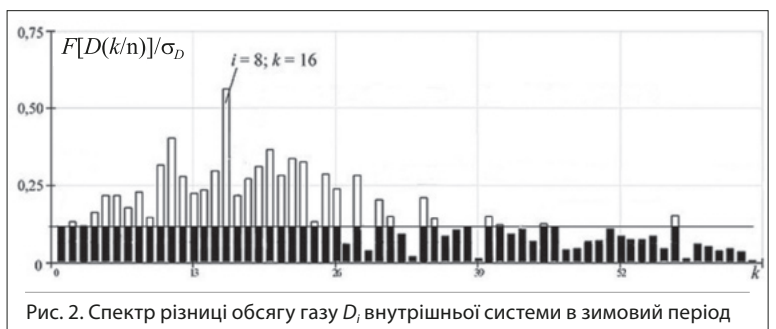


Рис. 2. Спектр різниці обсягу газу  $D_i$  внутрішньої системи в зимовий період

Для виділення з часових сигналів  $X(t_i)$ ,  $Y(t_i)$  періодичних складових представимо часові ряди в вигляді спектра. Таке перетворення виконуємо за допомогою перетворення Фур'є. Оскільки в розрахунках використовуємо дискретну кінцеву послідовність добових значень витрати газу, застосуємо дискретну апроксимацію фінішного швидкого перетворення Фур'є [8].

$$F\left[X(k/n)=\sum_{i=1}^n X(t_i) \cdot \exp(-j2\pi ki/n); (k=1,2, K, N)\right], \quad (7)$$

де  $j = -1$ ;  $n$  – кількість часових вибірок;  $N$  – кількість гармонік спектра.

З рівняння (7) отримуємо амплітуду окремих  $k$ -тих гармонік спектра  $F[X(k/n)]$ . Під час аналізу спектральні співвідношення зв'язані швидкими перетвореннями Фур'є, що потребує величини вибірки  $n = 2^m$ , де  $m$  – ціле число. Вибираємо  $m = 7$ , що відповідає  $n = 128$ . Мінімально допустима вибірка  $n = 50$ .

Спектральний аналіз часових рядів вибірки  $n = 128$  і  $n = 64$  для внутрішньої системи (ВС) (рис. 1) показує, що крім дискретних періодичних складових і широкополосного шуму, спектр має два піки на малих частотах (перша і друга гармоніки), що обумовлено наявністю лінійного тренда часових рядів  $X(t_i)$  і  $Y(t_i)$ . Тому, крім компоненти, яка описується періодичними функціями (один місяць  $k = 4$ ) і технологічними періодами (один тиждень  $k = 16$ ), а також випадкових процесів, у рядах спостерігається плавний довготерміновий рух, що описується деякою безперервною функцією надходження газу. На спектрі (див. рис. 1) представлено відносні значення  $k$ -тих гармонік  $F[X(k/n)]\sigma_X$ .

З метою встановлення наявності тренда проведено перевірку випадкових часових рядів за допомогою методів поворотних точок і різниць [7]. Ці методи дали змогу виявити тренд у рядах  $X(t_i)$  і  $Y(t_i)$ . На основі методу Форстера–Стюарта [7] приймаємо гіпотезу про наявність тренда в дисперсії. Аналогічна оцінка тренда для різниці  $D(t_i)$  встановила його відсутність. Спектри  $F[D(k/n)]$  ВС не мають збільшених перших гармонік із періодом в один місяць (рис. 2). Спектр різниці  $F[D(k/n)]$  для транзитної системи являє собою широкополосний процес Гауса, характерний для «білого» та «рожевого» шуму. Величина  $D(t_i)=X(t_i)-Y(t_i)$  у часі є стаціонарним випадковим процесом, оскільки амплітуди гармонік спектрів  $F[X(k/n)]$  і  $F[Y(k/n)]$  для  $k=1, 2, K, N$  відрізня-

ються одна від одної на статистично сталу випадкову величину.

Під час коригування значень надходження та розподілу по внутрішній системі, що показують викривлення часових рядів  $X(t_i)$  і  $Y(t_i)$ , у спектрі з'являється амплітудно-частотна модуляція періодичного сигналу з періодом  $i = 8$  діб (див. рис. 2). З метою збільшення інформативності такого методу необхідно дослідити вплив амплітуд окремих гармонік спектрів  $F[X(k/n)]$  і  $F[Y(k/n)]$  на статистичні характеристики  $D(t_i)$ . Для цього із отриманого спектра  $k=1 \dots N$  вилучаємо амплітуди гармонік  $k=1 \dots z$ , що ділять спектр на дві частини: перша з гармоніками  $k=1, 2, \dots, z$  та друга з гармоніками  $k=z+1, z+2, \dots, N$ . Після цього до обох частин розділеного спектра застосовуємо зворотне перетворення Фур'є [6]:

$$\left. \begin{aligned} X_z(t_i) &= \sum_{k=z+1}^n F[X(k/n)] \exp(j2\pi ki/n); \\ Y_z(t_i) &= \sum_{k=z+1}^n F[Y(k/n)] \exp(j2\pi ki/n); \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$(i=1,2, K, n)$ .

У цьому випадку використовується дискретна апроксимація швидкого зворотного перетворення Фур'є для вибірки  $n = 128$ . Таким чином, друга частина  $X_z(t_i)$  і  $Y_z(t_i)$  (див. рис. 2) є часовими рядами, з яких вилучено  $z$  амплітуд гармонік.

Аналогічно до (1) представимо різницю надходження і розподілу природного газу у вигляді

$$D_z(t_i) = X_z(t_i) - Y_z(t_i); (i=1,2, \dots, n; z=1,2, K). \quad (9)$$

Визначаючи послідовно статистичні характеристики  $D_z(t_i)$  для  $z = 1, 2, \dots$ , отримуємо залежність коефіцієнтів варіації  $v_z = (\sigma_{D_z}/D_z)$  від кількості вилучених гармонік  $z$ . Якщо дані надходження та розподілу природного газу ЕС не коригуються, коефіцієнт варіації рівний  $v_z = 2$  (рис. 3) і не залежить від вилучених гармонік, тобто від тренда. За коригованих змін параметрів ВС коефіцієнти варіації завищені в п'ять разів ( $v_z = 10$ ) і полого спадають зі зменшенням тренда (див. рис. 3).

Можемо простежити, що коефіцієнт варіації  $v_z$  впливає на коефіцієнт кореляції  $K_z$  між  $X_z(t_i)$  і  $Y_z(t_i)$ . Коефіцієнт кореляції ЕС не залежить від вилучених гармонік і рівний  $K_z \approx 1$  в усьому діапазоні  $z$ . Під час коригування складових балансу по ВС коефіцієнт кореляції істотно залежить від вилучених гармонік (рис. 4) і при  $10 < z < 22$   $K_z = 0$ .

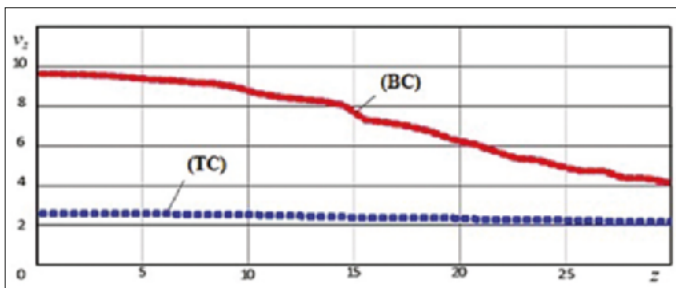


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів варіації  $v_z$  від вилучених гармонік спектрів у зимовий період

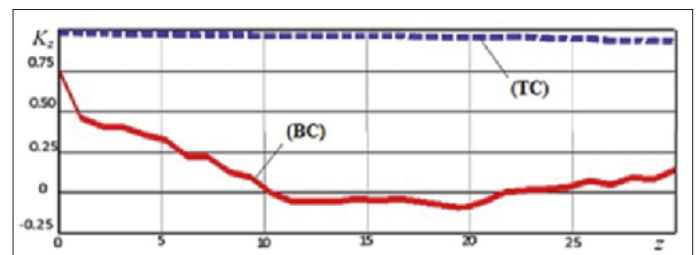


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів кореляції  $K_z$  від вилучених гармонік спектра в зимовий період



**Висновки**

Приведені значення розбалансів газу по внутрішній системі не перевищують похибки вимірювання приладів обліку природного газу, але порушують Гаусів закон розподілу часових рядів різниці обсягу розподілу газу  $D(t)$ . Коригування часових рядів розподілу природного газу обумовлено заниженням надходження та розподілу газу в межах класу точності приладів обліку природного газу.

За рахунок вилучення гармонік спектра підвищується інформативність коефіцієнта кореляції. Установлено, що за внутрішньою системою коефіцієнт кореляції значно менше від еталонного значення. Тому статистичні дані звітності частково не відповідають дійсності. У транзитній системі Гаусів закон щільності ймовірності  $D(t)$  не порушений. Коефіцієнт кореляції відповідає еталонному значенню і характеризує істинні розбаланси природного газу.

**Список літератури**

1. **Андрієшин М.П.** Розрахунок і аналіз балансових показників транспорту, зберігання та споживання газу по газотранспортній системі підприємства / М.П. Андрієшин, П.Р. Гімер, В.П. Рудко, П.Г. Гаврильців // Нафт. і газова пром-сть. – 1995. – № 2. – С. 38–41.
2. **Андрієшин М.П.** Укргазпром в нових умовах газопостачання України / М.П. Андрієшин // Нафт. і газова пром-сть. – 1997. – № 1. – С. 31–33.
3. **Ігуменцев Є.О.** Виявлення перетоків газу в запірній арматурі КС за реєстрацією вібраційного сигналу / Є.О. Ігуменцев, Я.С. Марчук, М.П. Андрієшин // Нафт. і газова пром-сть. – 2003. – № 2. – С. 13–18.
4. **Бурных И.С.** Определение объемов и структуры «технологических потерь» газа, их взаимосвязи с утечками газа из магистральных газопроводов / И.С. Бурных, И.А. Дутчак // Питання розвитку газової промисловості України. – 1999. – Вип. XXVII. – С. 75–90.

5. **Сапрыкин С.А.** Экспериментальные исследования герметичности магистральных газопроводов АО «Укргазпром» / С.А. Сапрыкин, В.С. Бурных, И.А. Дутчак, И.И. Капцов // Питання розвитку газової промисловості України. – 1999. – Вип. XXVII. – С. 59–67.

6. **Методика** визначення обсягів витрат природного газу на виробничо-технологічні потреби під час його транспортування газотранспортною системою та експлуатації підземних сховищ газу. – К., 2000.

7. **Марчук Я.С.** Корреляционный критерий нарушения баланса газа по газопроводу / Я.С. Марчук, М.П. Андрієшин, Е.А. Ігуменцев, В.Л. Добров // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». Сб. научн. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 35. – С. 57–66. – (Тем. вып.: «Приборы и методы неразрушающего контроля»).

8. **Форстер Э.** Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Форстер, Рёнц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 301 с.

**Автор статті****Андрієшин Михайло Петрович**

Кандидат технічних наук, доцент. Директор Метрологічного центру Національної акціонерної компанії «Нафтогаз України». Закінчив Івано-Франківський інститут нафти та газу за фахом спорудження газонафтопроводів, газонафтохранилищ і нафтобаз; Московський інститут нафтохімічної та газової промисловості ім. Губкіна, аспірантуру. Основні напрями діяльності, наукових досліджень – технологія трубопровідного транспорту та підземного зберігання природного газу; метрологія; вимірювання витрати та кількості природного газу.

**НОВИНИ****Перспективні газові проекти Росії**

Останнім часом Президент Росії Володимир Путін і Голова правління ВАТ «Газпром» оголосили плани реалізації серії газових проектів, які включають як розширення діючих великих газових магістралей, так і повернення до раніше запланованих проектів. Серед цих проектів слід особливо виділити такі, як:

відновлення роботи над проектом розробки унікального Штокманівського газового родовища, що в Баренцовому морі;

спорудження третьої нитки газопроводу «Північний потік» по дну Балтійського моря до Західної Європи з її подовженням для постачання газу до Нідерландів і Великої Британії. Це дасть можливість збільшити потужність Північного потоку з 55 до 80 млрд м<sup>3</sup> на рік;

проектів Південного потоку продуктивністю 63 млрд м<sup>3</sup> на рік із чотирма паралельними нитками по дну Чорного моря як ще один маршрут до Європи. Передбачається спрямувати гілку нового газопроводу в південно-західному напрямку до Італії замість північно-західного до Центральної Європи, як планувалося раніше;

будівництво газопроводу з Білорусі через польську територію до Словаччини Кобрин–Вельке Капушани з метою безпосереднього з'єднання Росії з Центральною Європою в обхід газотранспортної системи України.

*Pipeline&Gas Journal/November 2013, p.85*