

УДК 621.6+519.8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.143.1067

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРУПОВОГО ВРАХУВАННЯ АРГУМЕНТІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ГАЗУ НАСЕЛЕННЯМ

ТКАЧОВА В. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

БЕРЕЗЮК Г. Г.², ст. викл.,

ПРОКОФ'ЄВА Г. Я.³, канд. техн. наук, доц.,

СОЛОД Л. В.⁴, канд. техн. наук, доц.,

АДЕГОВ О. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 152-25-06, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

² Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 501-93-84, e-mail: berezuk.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

³ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 284-34-87, e-mail: chornomorets.halina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

⁴ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 681-12-02, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

⁵ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 505-51-51, e-mail: adehov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Анотація. Постановка проблеми. Серед найважливіших завдань оптимізації режимів роботи міських газорозподільчих систем – розроблення найближчої стратегії таких режимів. Обробка планових і статистичних показників режимів газоспоживання – один із ключових методів забезпечення оптимального функціонування та нормальної експлуатації систем газопостачання. Найбільш перспективним методом моделювання для розв'язання задач прогнозування став метод самоорганізації моделей, реалізований як метод групового урахування аргументів (МГУА). Короткострокове прогнозування обсягу газоспоживання становить основну вихідну інформацію для прийняття рішень у процесі планування режимів споживання й оперативно-диспетчерського управління. Метод МГУА, відомий також як метод Івахненко, – це потужний інструмент для отримання високоточних прогностичних моделей, що набуває значущості для прогнозування у керуванні енергетичними ресурсами та плануванні їх використання. Розв'язання подібної задачі актуальне, оскільки надає можливість аналізувати обсяги споживання природного газу населенням на майбутній період. **Мета статті** – методом групового урахування аргументів за вхідними даними побудувати математичні моделі прогнозування споживання газу. **Висновок.** Для вибору кращих моделей рекомендуються такі параметри: витрата газу завтрашнього дня як функція (основний критерій) та аргументи (додатковий критерій) – витрата газу на сьогоднішній день, температура повітря на сьогодні, температура вчорашнього дня і температури за минулі 3, 5, 7 днів, швидкість вітру і день тижня. Отримані математичні моделі споживання природного газу населенням можна буде застосувати для аналізу обсягів споживання природного газу. Метод дозволяє знайти єдину оптимальну математичну модель, яка найкращим чином розв'язує поставлену задачу.

Ключові слова: метод групового урахування аргументів; короткострокове прогнозування; споживання природного газу; прогностична модель

APPLICATION OF THE METHOD OF GROUP ARGUMENTS ACCOUNTING FOR BUILDING MODELS OF SHORT-TERM FORECASTING OF GAS CONSUMPTION BY THE POPULATION

TKACHOVA V.V.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

BEREZIUK H.H.², Sen. Lect.,

PROKOFIEVA H.Ya.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SOLOD L.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ADEHOV O.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 152-25-06, e-mail: tkachova.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9943-1852

² Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 501-93-84, e-mail: berezuiik.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

³ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 284-34-87, e-mail: chornomorets.halina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4964-5785

⁴ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 681-12-02, e-mail: solod.leontina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4789-9514

⁵ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning, Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 505-51-51, e-mail: adehov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Abstract. Problem statement. One of the most important tasks in optimizing the operation modes of urban gas distribution systems is to develop a short-term strategy for such modes. Processing of planned and statistical indicators of gas consumption modes is one of the key methods for ensuring the optimal functioning and normal operation of gas supply systems. The most promising modeling method for solving forecasting problems is the method of self-organization of models implemented as the method of group arguments accounting (MGAA). Short-term forecasting of gas consumption is the main source of information for decision-making in the process of planning consumption regimes and operational dispatch control. The MGAA method, also known as the Ivakhnenko method, is a powerful tool for obtaining highly accurate forecasting models and is gaining importance for forecasting in energy resource management and planning their use. The solution to such a problem is relevant, as it makes it possible to analyze the volume of natural gas consumption by the population for the future period. *The purpose of the article* is to build mathematical models for forecasting gas consumption using the method of group arguments accounting based on input data. **Conclusion.** To select the best models the following parameters are recommended: tomorrow's gas consumption as a function (main criterion) and arguments (additional criterion) - gas consumption to date, air temperature to date, yesterday's temperature and temperatures for the past 3, 5, 7 days, wind speed and day of the week. The resulting mathematical models of natural gas consumption by the population can be used to analyze the volume of natural gas consumption. The method allows us to find a single optimal mathematical model that best solves the problem.

Keywords: *method of group arguments accounting; short-term forecasting; natural gas consumption; prognostic model*

Постановка проблеми. Наразі особливо актуальними для сегмента газорозподілу стали питання забезпечення роботоздатності трубопроводів і обладнання газорозподільних мереж в умовах обмеженого постачання газу споживачам внаслідок можливого руйнування обладнання.

Своєчасне отримання інформації про майбутній обсяг газоспоживання має велике значення для оцінювання надійності та граничних режимів, а також для досягнення оптимального режиму в системі транспорту та розподілу газу. Точність короткострокового прогнозу обсягу споживаного газу суттєво впливає на ефективність роботи газотранспортних

систем. Недооцінка навантаження може спричинити зростання використання пікового обсягу, що, у свою чергу, викличе зниження резервів, а завищений прогноз навантаження може спонукати необґрунтоване збільшення резерву, і, отже, собівартості газу. Тому дуже важливим фактором бачиться якість оперативного прогнозування навантаження мережі.

Аналіз публікацій. Для прогнозування обсягів споживання природного газу широко застосовують математичні методи: нейронні мережі, нейро-нечіткі технології моделювання, еволюційні алгоритми, часові ряди, статистичні методи (методи кореляційного, регресійного та дисперсійного аналізів) та інші.

Застосування методу прогнозування споживання газу, що поєднує генетичні алгоритми та авторегресійне переміщення, міститься в дослідженні [1].

Прогнозування групового споживання газу в побутовому секторі, у місті чи районі розглянуте в працях [2–4].

У статті [5] висвітлено метод прогнозування споживання природного газу індивідуальними абонентами в опалювальний сезон.

Для створення математичної моделі короткострокового прогнозування споживання газу потрібно визначити її структуру та оцінити параметри за допомогою статистичних або експериментальних даних. Складність моделювання споживання природного газу визначається необхідністю врахування багатьох факторів. Для розв'язання таких задач пошук оптимальних параметрів можливо реалізовувати за допомогою еволюційних методів [6–9].

Відомо, що на величину обсягу споживаного газу впливають такі фактори як ступінь охоплення і структура споживачів, виробнича та побутова активність населення, метеорологічні чинники тощо. Саме обмеження в доступі до загальної інформації потребують застосування спеціалізованих методів, спрямованих на розв'язання задач в саме таких умовах. Метод самоорганізації, який заснував видатний український вчений в галузі автоматичного управління, кібернетики та інформатики Олексій

Григорович Івахненко, являє собою спробу різкого підвищення точності математичного моделювання, при короткому періоді спостереження процесу [10–12].

Мета дослідження – побудова математичних моделей з урахуванням числа факторів (обсягу споживання природного газу населенням і кліматичних даних) за допомогою методу групового урахування аргументів (МГУА) для прогнозування споживання природного газу населенням.

Виклад матеріалу. Для вибору кращих моделей методом самоорганізації обрано такі параметри: витрата газу завтрашнього дня як функція (основний критерій) та аргументи (додатковий критерій) – витрата газу на сьогоднішній день, температура повітря на сьогодні, температура вчорашнього дня і температури за минулі 3, 5, 7 днів, швидкість вітру і день тижня (табл. 1).

Використовуючи дані параметри, будують варіанти моделей для деяких або всіх аргументів. Для кожної моделі визначають її змінні (A_1, A_2, A_3). Серед усіх моделей вибирають кілька найкращих. При першому відборі змінних навчальної послідовності, взятої з перших 16 точок, у процесі пошуку відібрано 21 залежність, яка складається з кращих пар аргументів (табл. 2). У процесі пошуку рішень кількість похибок зменшується з кожною ітерацією. В першій парі змінних дуже велика неузгодженість, яка з кожною новою парою наближається до мінімуму.

Таблиця 1

Вихідні дані газоспоживання за листопад, м. Дніпро

Дні листопада	f	1	2	3	4	5	6	7	8
	$V_{\text{прогн.}}$ тис.м.куб.	$V_{\text{факт. (насел.)}}$ тис.м.куб.	$t, ^\circ\text{C}$	$t_{-1}, ^\circ\text{C}$	$t_{-3}, ^\circ\text{C}$	$t_{-5}, ^\circ\text{C}$	$t_{-7}, ^\circ\text{C}$	$W, \text{M}/\text{C}$	День тижня
1	1 701,119	1 638,294	4,4	5,9	5,6	4,0	2,4	6	Сб
2	1 692,142	1 701,119	1,8	4,4	5,5	4,8	3,3	6	Нд
3	1 602,063	1 692,142	-0,7	1,8	4,0	4,6	3,7	3	Пн
28	1 901,310	1 920,973	-2,5	-4,2	-4,0	-4,4	-3,8	2	Пт
29	2 065,619	1 901,310	-1,6	-2,5	-3,7	-3,6	-4,2	5	Сб
30	2 374,495	2 065,619	-4,6	-1,6	-2,8	-3,2	-3,7	5	Нд

Таблиця 2

Значення змінних на навчальній послідовності 1-го ряду селекції

№	Аргумент	Цільова функція E1	Змінна A1	Змінна A2	Змінна A3
1	1,2	0,0415	1,889	-1,367	2,135
2	1,3	0,0267	1,036	0,015	0,540
3	1,4	0,0269	0,905	0,149	0,439
4	1,5	0,0230	0,688	0,290	0,441
5	1,6	0,0204	0,721	0,312	0,369
18	4,7	0,0270	0,912	0,290	0,059
19	5,6	0,0322	1,200	0,176	0,115
20	5,7	0,0277	1,075	0,043	0,058
21	6,7	0,0255	0,881	0,338	0,058

За підсумками зіставлення результатів перевіркої та навчальної послідовностей (табл. 2) отримані найкращі значення змінних: $A1 = 0,688$; $A2 = 0,290$; $A3 = 0,441$.

Розрахунок прогнозованих витрат газу проведений за формулою:

$$V = A1 + A2 \cdot X1 + A3 \cdot X2,$$

де $X1$ – фактичні витрати газу, $X2$ – безрозмірний комплекс температури F .

$$V_1 = 0,688 + 0,290 \cdot 1,638\ 294 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,488\ 122 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_2 = 0,688 + 0,290 \cdot 1,701\ 119 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,487\ 819 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_3 = 0,688 + 0,290 \cdot 1,692\ 142 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,489\ 626 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{28} = 0,688 + 0,290 \cdot 1,920\ 973 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,765\ 021 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{29} = 0,688 + 0,290 \cdot 1,901\ 310 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,740\ 797 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{30} = 0,688 + 0,290 \cdot 2,065\ 619 + 0,441 \frac{18 - 4,0}{19} = 1,779\ 186 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}}.$$

На кожній ітерації відбувається селекція найбільш перспективних сполучень змінних. У кожному ряду розглядаються всі комбінації змінних (тобто всі моделі даного рівня складності). Краща комбінація в ряду визначає умови переходу від поточного ряду до наступного. В інших варіантах методу в кожному ряду не тільки розглядається найкраща модель, а й відбираються найкращі поєднання змінних. Вони і задають моделі наступного ряду. Знайдені на наступному кроці моделі використовуються як аргументи для опорних функцій наступного етапу ітерації (перехід на 2-й пункт). Тобто вже знайдені моделі беруть участь у формуванні більш складних наступних 14 елементів.

У другому ряду розглядаються функції від усіх пар обраних змінних. Відбувається формування нових змінних із кращих змінних поточного ряду. На наступному етапі ітерації із загальної кількості змінних були взяті точки навчальної послідовності по всіх перевірних (табл. 3).

Таблиця 3

Значення критерію моделювання на перевірній послідовності 1-го ряду селекції

Порядковий номер моделі	Порядкові номери 2 аргументів	Значення цільової функції E2
1	1,2	0,250
2	1,3	0,157
3	1,4	0,143
19	5,6	0,286
20	5,7	0,332
21	6,7	0,234

При зіставленні результатів навчальної та перевірної послідовностей отримано найкращі поєднання параметрів. Розглянемо найбільш збіжні результати (табл. 4).

Таблиця 4

Результати вибору математичних моделей 1-го ряду селекції

Порядковий номер вибраних моделей	Аргументи	Порядковий номер розглянутих моделей
1	1,5	4
2	1,6	5
3	3,7	15
4	3,6	14
5	1,4	3
6	3,4	12
7	1,3	2

Оскільки в програмі аргументи були зведені до безрозмірного вигляду, проводимо розрахунок за формулою:

$$F = (18-F)/19, \text{ де } F = t,$$

де t – температура навколишнього середовища; F – безрозмірний комплекс температури.

Значення цільової функції E_1 на навчальній послідовності знаходимо за формулою:

$$E_1 = \frac{S_1}{n_0}, \text{ де } S_1 = \sum_1^{n_0} (V_{\text{рознр.}i} - V_{\text{факт.}i})^2,$$

де n_0 – кількість навчальних послідовностей.

Значення цільової функції E_2 на перевірній послідовності знаходимо за формулою:

$$E_2 = \frac{S_2}{n_n}, \text{ де } S_2 = \sum_1^{n_n} (V_{\text{рознр.}i} - V_{\text{факт.}i})^2,$$

де n_n – кількість перевірних послідовностей.

На підставі отриманих значень розрахунку будуюмо графічну залежність фактичних та прогнозованих витрат газу (рис. 1) і робимо висновок, що графічний прогноз недостатньо точний при відборі залежностей, які складаються з двох змінних. Тому розглянемо, який прогноз може дати сумісність трьох аргументів із чотирма змінними (табл. 5).

Таблиця 5

Значення змінних на навчальній послідовності 2-го ряду селекції

№	Аргумент	Цільова функція E1	Змінна A1	Змінна A2	Змінна A3	Змінна A4
1	1,2,3	0,0031	0,256	-2,171	-1,533	-0,009
2	1,2,4	0,0001	0,227	-5,853	-0,655	-0,092
34	4,6,7	$6,04 \cdot 10^{-5}$	0,049	0,032	-0,017	-0,004
35	5,6,7	0,023	0,036	0,031	-0,194	-0,004

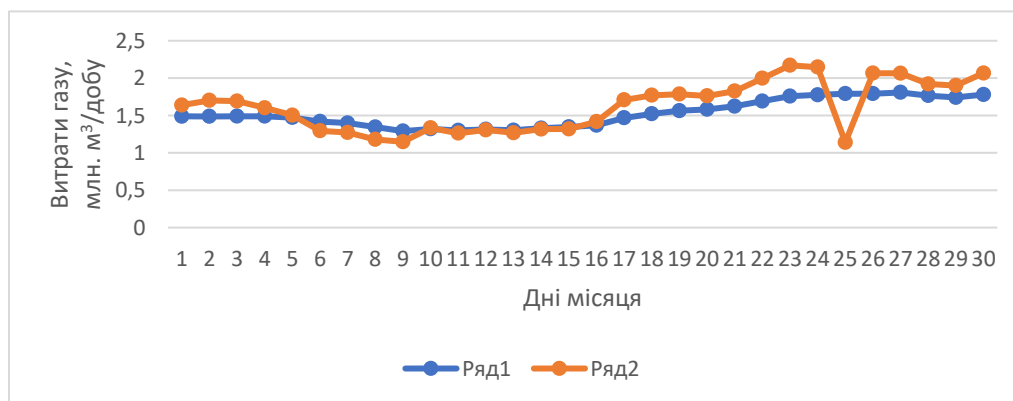


Рис. 1. Порівняння результатів прогнозованих і фактичних витрат газу з двома змінними аргументами: ряд 1 – прогнозовані витрати газу, млн м³/добу; ряд 2 – фактичні витрати газу, млн м³/добу

При першому відборі змінних навчальної послідовності в процесі пошуку було відібрано 35 залежностей, де із

загальної кількості змінних взято точки навчальної послідовності по всіх перевірних (табл. 6).

Таблиця 6

Значення критерію на перевірній послідовності 2-го ряду селекції

Порядковий номер моделі	Порядкові номери 3 аргументів	Значення цільової функції E2
1	1,2,3	0,038
2	1,2,4	0,00057
3	1,2,5	$6,53 \cdot 10^{-5}$
...
33	4,5,7	0,008
34	4,6,7	0,0003
35	5,6,7	0,011

При зіставленні результатів навчальної та перевірної послідовностей 2-го ряду селекції отримано найкращі поєднання параметрів (табл. 7). Основні ідеї методу: зменшити кількість моделей, розглянутих на кожному ряду, але при цьому не втратити

вдалого поєднання змінних, зменшити кількість рядів і тим самим прискорити вихід на оптимальний рівень складності.

Таблиця 7

Результати вибору математичних моделей 2-го ряду селекції

Порядковий номер вибраних моделей	Аргументи	Порядковий номер розглянутих моделей
1	1,6,7	15
2	1,4,6	11
3	1,4,7	12
4	1,5,6	13
5	1,5,7	14
6	1,2,5	3
7	1,2,7	5

Повторюємо розрахунок прогнозованих витрат газу:

$$V_1 = 0,005 + 1,058 \cdot 1,638\ 294 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 1,738\ 416 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_2 = 0,005 + 1,058 \cdot 1,701\ 119 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 1,805\ 382 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_3 = 0,005 + 1,058 \cdot 1,692\ 142 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 1,795\ 868 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{28} = 0,005 + 1,058 \cdot 1,920\ 973 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 2,038\ 252 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{29} = 0,005 + 1,058 \cdot 1,901\ 310 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 2,017\ 452 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}};$$

$$V_{30} = 0,005 + 1,058 \cdot 2,065\ 619 + 0,0007 \frac{18 - 2,4}{19} + 0,0007 \frac{18 - 6}{19} = 2,191\ 272 \frac{\text{млн м}^3}{\text{добу}}.$$

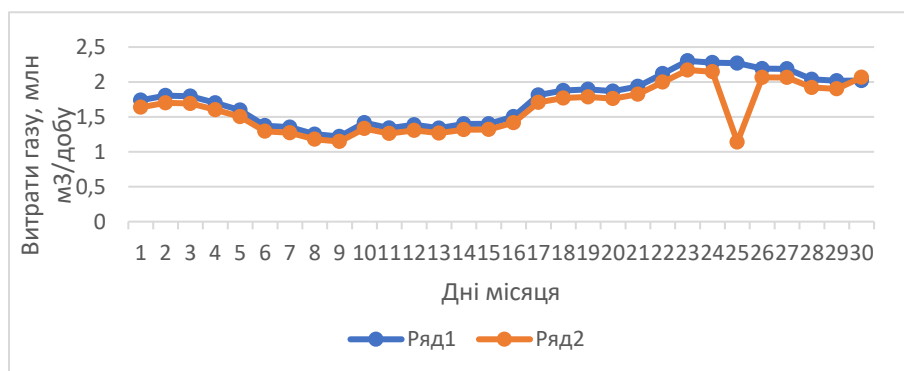


Рис. 2. Порівняння результатів прогнозованих і фактичних витрат газу з трьома змінними аргументами: ряд1 – прогнозовані витрати газу, млн м³/добу; ряд 2 – фактичні витрати газу, млн м³/добу

Графік (рис. 2) більш точний і показує, що з кожним кроком ітерації зменшується середньоквадратичне відхилення (СКВ) (E1 та E2), але після досягнення певного рівня складності (залежить від характеру і

кількості даних, а також загального вигляду моделі) відхилення починає зростати. За даного поєднання параметрів ми справді можемо спрогнозувати витрати газу.

Висновки.

Виконані розрахунки підтверджують доцільність застосування методу. Отримані моделі можна буде застосувати для прогнозування обсягів споживання газу.

Поступово збільшуючи складність математичної моделі і задаючи ряд значень її коефіцієнтів із деяким невеликим кроком (у межах, допустимих обмеженнями), можливо організувати повний перебір всіх можливих

варіантів моделі за вказаним критерієм селекції і таким чином знайти найкращу (з переглянутих) модель.

При збільшенні складності математичної моделі точність, яка обумовлена на окремій перевірній послідовності, спочатку зростає, потім починає падати. Існування мінімуму критерію селекції є основою в теорії самоорганізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cayir Ervurala Beyzanur, Beycab Omer Faruk, Zaimc Selim. Model estimation of ARMA using genetic algorithms. *A case study of forecasting natural gas consumption : proceedings of the 12th International Strategic Management Conference*. Antalya, Turkey, October 28–30, 2016. ISMC. 2016. Pp. 537–545.
2. Павлов А. В., Степашко В. С., Кондрашова Н. В. Эффективные методы самоорганизации моделей. Киев: Академперіодика, 2014. 197 с.
3. Soldo B. Forecasting natural gas consumption. *Applied Energy*. 2012. Vol. 92. Pp. 26–37.
4. Brabec M., Konar O., Pelikan E., Maly M. A nonlinear mixed effects model for the prediction of natural gas consumption by individual customers. *International Journal of Forecasting*. 2008. Vol. 24, № 4. Pp. 659–678.
5. Панкевич В. В., Штовба С. Д. Прогнозування споживання природного газу індивідуальними абонентами в опалювальний сезон : *Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. Вінниця, 22–24 березня 2017 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/3160>
6. Irodov V. F., Barsuk R. V., Chornomorets H. Y. Multiobjective Optimization at Evolutionary Search with Binary Choice Relations. *Cybern Syst Anal*. Vol. 56. 2020. Pp. 449–454. ISSN: 10600396, URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00260-7>
7. Irodov Vyacheslav, Shaptala Maksym, Dudkin Kostiantyn, Shaptala Daria, Prokofieva Halyna. Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tubular heaters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 3/8 (111). Pp. 50–59. ISSN 1729-3774, UDC 621.1.016+519.816. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235837.
8. Irodov V. F., Khatskevych Yu. V. Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 98. С. 91–96.
9. Иродов В. Ф., Барсук Р. В. Загальна схема побудови алгоритмів самоорганізації моделей складних систем з використанням еволюційного пошуку рішень. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2015. Вып. 86. С. 43–49.
10. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев : Наукова думка, 1982. 296 с.
11. Irodov V. Self-organization methods for analysis of nonlinear systems with binary choice relations. *Journal Systems Analysis Modeling Simulation*. New-York, USA Inc: Gordon and Breach Science Publishers, 1995. Vol. 18–19. Pp. 203–206.
12. Иродов В. Ф. О построении и сходимости эволюционных алгоритмов самоорганизации и случайного поиска. *Автоматика*. 1987. № 4. С. 34–43.

REFERENCES

1. Cayir Ervurala Beyzanur, Beycab Omer Faruk and Zaimc Selim. Model estimation of ARMA using genetic algorithms. *A case study of forecasting natural gas consumption : Proceedings of the 12th International Strategic Management Conference*. Antalya, Turkey, October 28–30, 2016, ISMC, 2016, pp. 537–545.
2. Pavlov A.V., Stepashko V.S. and Kondrashova N.V. *Effektyvnye metody samoorghanyzatsyy modelej* [Effective methods for self-organization of models]. Kyiv : Akadempriodyka Publ., 2014. (in Russian).
3. Soldo B. Forecasting natural gas consumption. *Applied Energy*. 2012, vol. 92, pp. 26–37.
4. Brabec M., Konar O., Pelikan E. and Maly M. A nonlinear mixed effects model for the prediction of natural gas consumption by individual customers. *International Journal of Forecasting*. 2008, vol. 24, no. 4, pp. 659–678.
5. Pankevych V.V. *Prediction of natural gas consumption by individual subscribers in the heating season : materialy XLVI naukovo-tekhnichnoji konferenciji pidrozdiliv VNTU* [Prediction of natural gas consumption by individual subscribers in the heating season : materials of the XLVI scientific and technical conference of VNTU units]. Vinnitsa : VNTU Publ., 2017. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/3160.-> (in Ukrainian).

6. Irodov V.F., Barsuk R.V. and Chornomorets H.Y. Multiobjective Optimization at Evolutionary Search with Binary Choice Relations. *Cybern Syst Anal.* 2020, no. 56, pp. 449–454. ISSN: 10600396, URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00260-7>.
7. Irodov Vyacheslav, Shaptala Maksym, Dudkin Kostiantyn, Shaptala Daria and Prokofieva Halyna. Development of evolutionary search algorithms with binary choice relations when making decisions for pellet tubular heaters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021, no. 3/8 (111), pp. 50–59. ISSN 1729-3774, UDC 621.1.016+519.816, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235837.
8. Irodov V.F. and Khatskevych Yu.V. [Convergence of the evolutionary algorithms for optimal solution with binary choice relations]. *Stroyteljstvo, materyalovedenye, mashynostroenye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2017, iss. 98, pp. 91–96.
9. Irodov V.F. and Barsuk R.V. *Zahal'na skhema pobudovy alhorytmiv samoorhanizatsiyi modeley skladnykh system z vykorystannyam evolyutsiynoho poshuku rishen'* [The general scheme of building algorithms for self-organization of models of complex systems using evolutionary search for solutions]. *Stroyteljstvo, materyalovedenye, mashynostroenye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2015, iss. 86, pp. 43–49. (in Ukrainian).
10. Ivakhnenko A.G. *Induktivnyy metod samoorganizatsii modeley slozhnykh sistem* [Inductive method of self-organization of models of complex systems]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1982, 296 p. (in Russian).
11. Irodov V. Self-organization methods for analysis of nonlinear systems with binary choice relations. *Journal Systems Analysis Modeling Simulation.* New-York, USA Inc: Gordon and Breach Science Publishers, 1995, vol. 18–19, pp. 203–206.
12. Irodov V.F. *O postroyenii i skhodimosti evolyutsionnykh algoritmov samoorganizatsii i sluchaynogo poiska* [On the construction and convergence of evolutionary algorithms of self-organization and random search]. *Avtomatyka* [Automation]. 2009, no. 4, pp. 34–43. (in Russian).

Надійшла до редакції: 02.03.2024.