

Максим'юк Сергій Орестович

*доцент Івано-Франківського національного технічного університету
нафти і газу*

ORCID: 0000-0002-6312-7047

Цих Віталій Сергійович

*кандидат технічних наук, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних
технологій Івано-Франківського національного технічного університету
нафти і газу*

ORCID: 0000-0002-9095-4099

Рибіцький Ігор Володимирович

*доктор технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних
технологій Івано-Франківського національного технічного університету
нафти і газу*

ORCID: 0000-0003-3596-3918

ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ГАЗОВОЇ СУМІШІ (ПРИРОДНИЙ ГАЗ І БІОМЕТАН) ДЛЯ РОЗГАЛУЖЕНИХ МЕРЕЖ ГАЗОПОСТАЧАННЯ

Декарбонізація газотранспортних мереж зумовлює підмішування біометану та водню до природного газу, що потребує оперативної оцінки їхнього впливу на теплотворну здатність. На основі 3500 експериментальних точок для сумішей «газ-біометан» уточнено кореляційну модель експрес-приладу контролю теплотворної здатності (ТЗ); нове нелінійне рівняння знизило середню відносну похибку до 0,25 % ($R = 0,827$; $R^2 = 0,684$; $F = 502,3$; $p < 0,001$). Для універсалізації методу адаптовано раніше створену штучну нейронну мережу, розширивши вибірку ще 3500 сумішами з біометаном і 17 500 – з воднем. Оновлена ШНМ, що враховує акустичні та газохімічні параметри, забезпечує високоточне відтворення нелінійних залежностей «склад – ТЗ» і підвищує надійність інформаційно-вимірювальних систем у процесі декарбонізації газових мереж.

Ключові слова: біометан; теплота згорання; ІВС; регресійна модель; штучна нейронна мережа; декарбонізація.

Serhii Maksymiuk

*PhD in Engineering, Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas*

Tsykh Vitalii

*PhD in Engineering, Head of the Department of Information and Measurement
Technologies, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

Rybitskyi Ihor

*Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and
Measurement Technologies*

Ivano-Frankivsk National Technical University

TECHNOLOGY FOR EVALUATING THE HEAT OF COMBUSTION OF GAS MIXTURES (NATURAL GAS AND BIOMETHANE) FOR BRANCHED GAS SUPPLY NETWORKS

Decarbonization of gas transmission networks requires the blending of biomethane and hydrogen into natural gas, which necessitates an operational assessment of their impact on calorific value. Based on 3,500 experimental points for gas-biomethane mixtures, the correlation model of the express calorific value (CV) control device has been refined; the new nonlinear equation reduced the average relative error to 0.25% ($R = 0.827$; $R^2 = 0.684$; $F = 502.3$; $p < 0.001$). To universalize the method, a previously created artificial neural network was adapted, expanding the sample by another 3,500 mixtures with biomethane and 17,500 with hydrogen. The updated ANN, which takes into account acoustic and gas chemical parameters, provides high-precision reproduction of nonlinear “composition-CV” dependencies and increases the reliability of information and measurement systems in the process of decarbonization of gas networks.

Keywords: biomethane; heat of combustion; IVS; regression model; artificial neural network; decarbonization.

Бібліографічний аналіз показав тренд декарбонізації сфери постачання природного газу, а саме домішування до природного газу в газотранспортній мережі інших газів – водню та біометану. Головною перевагою біометану перед зеленим воднем є можливість його транспортування за допомогою наявної газової інфраструктури без модернізації [1]. В Україні вже відомі перші випадки під'єднання до газорозподільчих мереж заводів з виробництва біометану, а у 2030 році очікується, що біометан може частково (0,2 млрд м³/рік) експортуватися з України до ЄС [1]. Тому актуальним є адаптації інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) оцінювання теплоти згорання природного газу в мережах низького тиску з врахуванням наявності в трубопроводах не тільки природного газу, а й його сумішей з біометаном.

Враховуючи переваги кореляційних методів оцінки показників якості природного газу над хроматографічним та калориметричним методами (швидкість вимірювання, можливість використання в потоковому режимі, дешевизна методу), в роботі [2] нами запропоновано використати прилад експрес-контролю теплоти згорання в ІВС оцінювання якості на рівні споживачів мереж низького тиску та розроблено для цього математичну модель. Проте виникає необхідність адаптації розробленої моделі з врахуванням особливостей при наявності в газопроводі біометану.

Виклад основного матеріалу

Проведено уточнення математичної моделі оцінки теплоти згоряння енергоресурсів із домішками біометану. Це уточнення базувалося на регресійному аналізі, виконаному для нового набору даних, який відображає суміші газів із різними концентраціями біометану. Результати аналізу дозволили вдосконалити модель шляхом застосування нелінійного рівняння з комбінованими параметрами та врахуванням константи.

Найкращою уточненою моделлю виявилось рівняння нелінійної моделі зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи:

$$Q_{\text{вищ}} = -97876,976 - CO_2 \cdot (1,232 \cdot v_1 - 24,718 \cdot V_1 + 52,312 \cdot CO_2 + 4,412 \cdot v_2 - 25,278 \cdot V_2) + v_1 \cdot (2,253 \cdot V_1 - 5,687 \cdot CO_2 - 0,514 \cdot v_2 + 2,321 \cdot V_2) + V_1 \cdot (22,362 \cdot CO_2 + 2,338 \cdot v_2) + CO_2 \cdot (0,799 \cdot v_2 + 22,698 \cdot V_2) + 2,367 \cdot v_2 \cdot V_2 + 43,593 \cdot V_1 \quad (1)$$

На основі нового рівняння повторно розраховано відносну точність визначення теплоти згоряння для енергоресурсів із домішками біометану. Результати показали, що середня відносна похибка знизилася до 0,25%. Це свідчить про суттєве підвищення точності у порівнянні з базовою моделлю, розглянутою раніше [2].

Для перевірки адекватності скоригованої моделі проведено аналіз статистичних показників. Зокрема, використано:

- коефіцієнти кореляції та детермінації;
- критерій Фішера для оцінки загальної значущості моделі;
- t-критерій Стюдента для перевірки значущості окремих параметрів.

Отримані результати представлено у таблицях 1-3.

Значення багатofакторного коефіцієнта кореляції $R=0,8269$ і коефіцієнта детермінації $R^2=0,6838$ свідчать про високий ступінь відповідності моделі до емпіричних даних. Нормований коефіцієнт $R^2=0,6824$ підтверджує стабільність моделі за врахуванням обмежень розрахункової вибірки.

Результати дисперсійного аналізу критерію Фішера (див. таблицю 1) показали, що значення $F=502,25$ перевищує табличне значення, що свідчить про

статистичну значущість регресійної моделі. Аналіз за t-критерієм Стьюдента (таблиця 2) показав, що всі параметри моделі є значущими, оскільки розрахункові значення t перевищують табличне значення 1,96 для заданого рівня значущості.

Таблиця 1 – Результати розрахунку регресійної статистики на прикладі скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

Багатофакторний коефіцієнт кореляції R	0,826912
Коефіцієнт детермінації R- квадрат	0,683783
Нормований R -квадрат	0,682422
Стандартна похибка	55,15866
Кількість спостережень	3500

Таблиця 2 – Результати дисперсійного аналізу критерію Фішера на прикладі скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимість F</i>
Регресія	15	22921268	1528085	502,25	0
Залишок	3484	10599994	3042,478		
Загалом	3499	33521262			

Таблиця 3 – Результати дисперсійного аналізу t-критерію Стьюдента на прикладі скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

<i>Параметри</i>	<i>Коефіцієнти</i>	<i>Стандартна похибка</i>	<i>t-критерій</i>	<i>P-значення</i>	<i>Нижнє 95%</i>	<i>Верхнє 95%</i>	<i>Нижнє 95,0%</i>	<i>Верхнє 95,0%</i>
Перехоплення	-97877	6872,976	-14,2408	9,01E-45	-111352	-84401,5	-111352	-84401,5
CO2_1*Шв_1	-1,23157	0,091444	-13,4681	2,42E-40	-1,41086	-1,05229	-1,41086	-1,05229
CO2_1*V_1	24,71886	1,654083	14,94415	5,43E-49	21,47579	27,96193	21,47579	27,96193
CO2_1*CO2_2	-52,3128	4,288664	-12,1979	1,53E-33	-60,7213	-43,9042	-60,7213	-43,9042
CO2_1*Шв_2	-4,41236	0,339551	-12,9947	9,75E-38	-5,0781	-3,74662	-5,0781	-3,74662
CO2_1*V_2	25,27858	1,660202	15,22621	9,83E-51	22,02352	28,53365	22,02352	28,53365
Шв_1*V_1	2,253845	0,151156	14,91073	8,7E-49	1,957482	2,550208	1,957482	2,550208
Шв_1*CO2_2	-5,68744	0,404524	-14,0596	1,03E-43	-6,48057	-4,89431	-6,48057	-4,89431
Шв_1*Шв_2	-0,51432	0,032535	-15,8079	2,05E-54	-0,57811	-0,45053	-0,57811	-0,45053
Шв_1*V_2	2,320891	0,151615	15,30775	3,05E-51	2,023627	2,618155	2,023627	2,618155
V_1*CO2_2	22,36228	1,95616	11,43173	9,77E-30	18,52695	26,19762	18,52695	26,19762
V_1*Шв_2	2,338796	0,14776	15,82838	1,51E-54	2,049092	2,6285	2,049092	2,6285
CO2_2*Шв_2	0,799337	0,19824	4,032169	5,64E-05	0,410659	1,188015	0,410659	1,188015
Шв_2*V_2	22,69844	1,951506	11,63124	1,05E-30	18,87223	26,52465	18,87223	26,52465

Скоригована модель демонструє значне покращення у точності розрахунків вищої теплоти згоряння палива в умовах інтеграції біометану. Рівняння враховує комбіновані впливи основних параметрів, зокрема взаємодію між вмістом CO₂, швидкістю поширення ультразвуку та іншими змінними. Це дозволяє забезпечити не лише високу точність, але й універсальність моделі для різних типів газових сумішей. Крім того, покращені статистичні показники свідчать про надійність моделі.

Враховуючи особливості розробленої у роботі [1] штучної нейронної мережі (ШНМ), її гнучкість та здатність до навчання на основі нових даних, доцільним є адаптація моделі для аналізу теплотворної здатності природного газу у випадках закачування водню та біометану в газотранспортну мережу. Сучасні дослідження свідчать про швидкий розвиток технологій з домішування альтернативних газів до природного газу, що ускладнює побудову традиційних регресійних моделей через відсутність прямих кореляцій та нелінійність взаємозв'язків параметрів. У таких умовах використання ШНМ є обґрунтованим завдяки її можливості адаптивно моделювати складні залежності та навчатися на нових обсягах даних.

Процес навчання ШНМ виконувався з урахуванням попередньої архітектури моделі та вимог до узагальнюючої здатності. Структурна схема оновленої мережі була збережена, проте обсяг даних для навчання значно розширено, що забезпечує підвищення точності прогнозування. Розширення функціональності ШНМ здійснено шляхом доповнення початкового набору даних, що містить 3500 значень, новими вимірами:

- 3500 значень для біометану,
- 17500 значень для водню.

Суттєве збільшення обсягу даних забезпечує високу точність моделювання, однак вимагає використання саме нейромережових алгоритмів через їхню здатність до обробки великих масивів інформації та виявлення прихованих закономірностей.

Адаптована нейронна мережа побудована на основі існуючої архітектури, що включає вхідний, прихований та вихідний шари. При цьому враховано:

- Особливості теплотворної здатності природного газу зі змішаним вмістом водню та біометану, що призводять до зміни акустичних, фізико-хімічних та енергетичних характеристик газу.
- Вплив часток об'ємних витрат потоків газу (з урахуванням концентрацій водню та біометану) на нелінійний розподіл теплотворної здатності.
- Адаптацію вхідних параметрів мережі шляхом інтеграції нових ознак, що описують швидкість ультразвуку в газі, вміст CO₂, частку об'ємної витрати та температуру для кожного із потоків.

На рисунку 1 представлені ключові метрики і графіки, які відображають динаміку навчання.

Отримані матриці коефіцієнтів взаємозалежності між нейронами ШНМ та інші x-стики побудованої ШНМ наведені на рисунках 1-3.

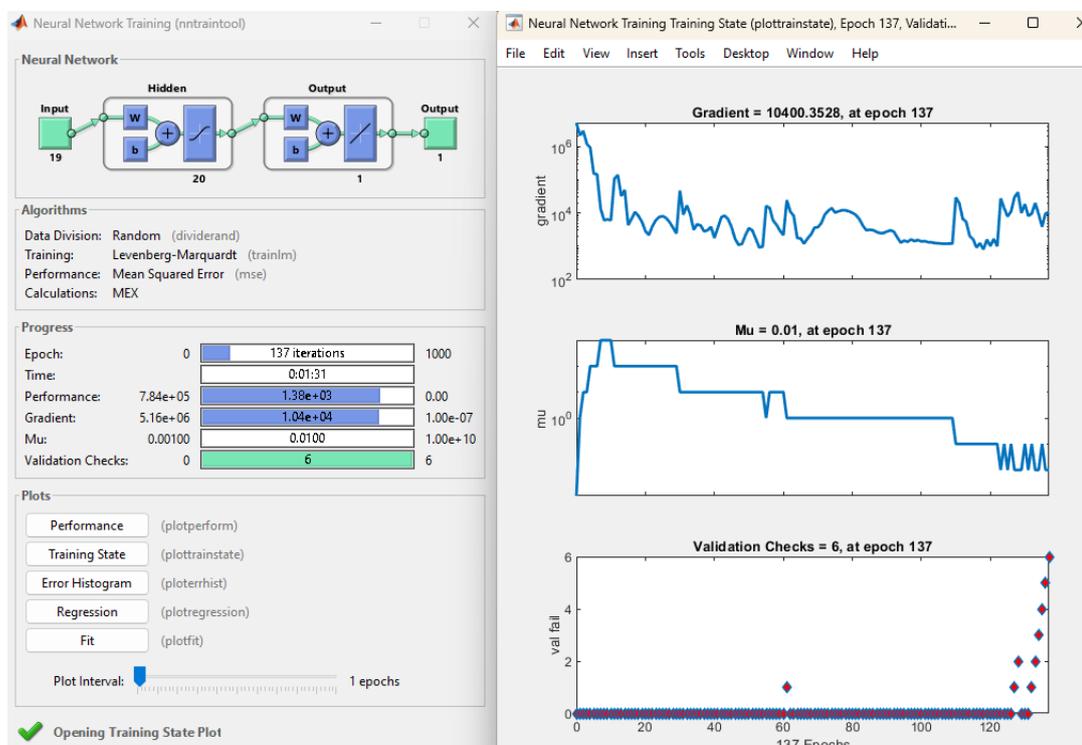


Рисунок 1 – Процес навчання нейронної мережі: динаміка градієнта, параметра μ та перевірки валідації

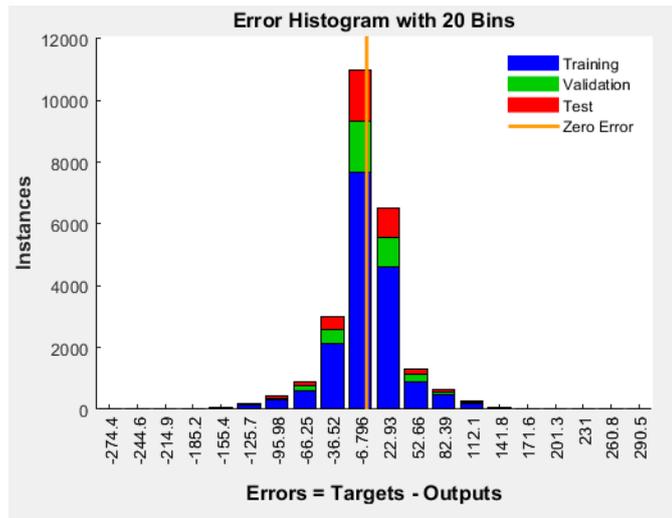


Рисунок 2 – Гістограма похибок розробленої, провалідованої і тестованої моделей

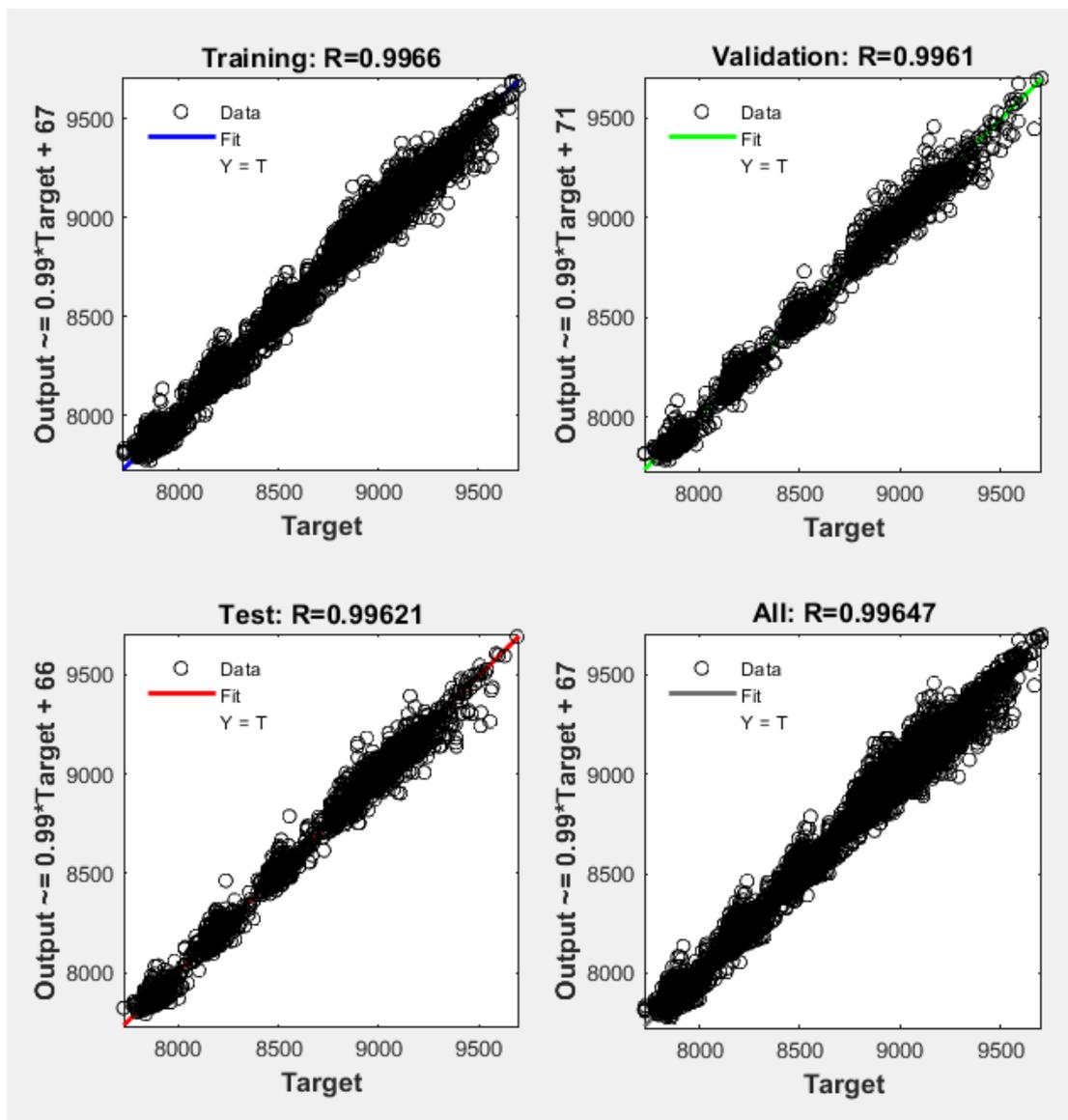


Рисунок 3 – Графіки залишків та коефіцієнти кореляції тренованої, валідованої моделей та моделі тестування

Таким чином, адаптація розробленої ШНМ до нових умов функціонування газотранспортної мережі забезпечує можливість моделювання енергетичної цінності газу у випадках закачування водню та біометану. Такий підхід є перспективним для подальшого вдосконалення систем контролю якості та енергетичної оцінки газових потоків в умовах розвитку технологій декарбонізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev. Prospects and potential for Biomethane Production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potentialfor-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>

2. Maksymiuk, S., Rybitskyi, I., Karpash, O., Tsykh, V., Doroshenko, Y. (2024). Method for Estimating the Calorific Value of Natural Gas for Branched Networks Using Express Quality Control Tools. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, vol 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_16

REFERENCES

3. Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev. Prospects and potential for Biomethane Production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potentialfor-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>

4. Maksymiuk, S., Rybitskyi, I., Karpash, O., Tsykh, V., Doroshenko, Y. (2024). Method for Estimating the Calorific Value of Natural Gas for Branched Networks Using Express Quality Control Tools. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, vol 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_16