

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

**І.В. Рибіцький¹, О.М. Карпаш¹, С.С. Войтенко¹, М.О. Карпаш², П.М. Райтер³, А.В. Яворський³,
І.Р. Ващишак³**

¹Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 61123, м. Харків, вул. Полтавський Шлях, 123.
E-mail: info@hups.mil.gov.ua

²Університет Короля Данила, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Євгена Коновальця, 35. E-mail: university@ukd.edu.ua

³Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.
E-mail: admin@nung.edu.ua

Актуальність питання контролю якості природного газу, в першу чергу його енергетичних характеристик, зокрема його питомої вищої та нижчої теплоти згоряння на даний час обумовлена вимогами Закону України, що регламентує запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії. У роботі наведено результати досліджень щодо удосконалення методу експрес-контролю теплоти згоряння, як вищої так і нижчої, природного газу, що відповідає вимогам Закону України «Про ринок природного газу». Показано, що застосовані схемотехнічні рішення дозволяють значно зменшити похибку вимірювання, реалізувати можливість вимірювання не тільки нижчої, але й вищої теплоти згоряння природного газу, а також розширити можливості застосування реалізованого пристрою як у промислових, так і в побутових умовах. Бібліогр. 11, рис. 9.

Ключові слова: якість природного газу, вимірювання, ультразвукові коливання, підвищення точності, тригер, температурна залежність

Вступ. Значну роль у глобальному енергетичному переході до низьковуглецевої енергетики відіграє природний газ, оскільки він є найчистішим викопним паливом. Перехід з вугілля на природний газ з метою суттєвого зменшення викидів CO₂ спричинив швидке зростання споживання природного газу в світі [1]. Окрім природного газу, з кінця 2024 р. у газотранспортну систему (ГТС) України почалася передача біометану, що пояснюється вимогами законів України щодо розвитку виробництва біометану, які закладають основу для виробництва, використання, а також його експорту. Збагачений біометан не відрізняється від природного газу, тому його можна транспортувати та використовувати таким же чином, має переваги природного газу, залишаючись при цьому вуглецево нейтральним [2].

Актуальності задача визначення одного з основних якісних фізико-хімічних показників (ФХП) природного газу, а саме, значення об'ємної вищої і нижчої теплоти згоряння, набуває через значну розгалуженість ГТС України, наявність багатьох точок входу в систему від різних джерел і динамічний характер її роботи. Оперативне визначення теплоти згоряння природного газу – це не тільки встановлення його енергетичної цінності, а й для багатьох споживачів можливість керувати числен-

ними технологічними процесами для досягнення необхідної якості продукту. На даний час кодекс ГТС України передбачає визначення ФХП природного газу в точках виходу, погоджених з операторами суміжних систем або прямими споживачами, з використанням автоматичних потокових приладів (автоматичних хроматографів і вологомірів) та/або вимірювальних хіміко-аналітичних лабораторій [3]. Точки визначення ФХП (місця відбору проб) природного газу та періодичність проведення вимірювань при використанні для визначення ФХП вимірювальних хіміко-аналітичних лабораторій узгоджуються оператором газотранспортної системи з операторами суміжних систем, суміжними газовидобувними підприємствами або іншими суб'єктами, безпосередньо підключеними до газотранспортної системи, окремим протоколом [4]. Як правило, за допомогою потокових хроматографів значення теплоти згоряння природного газу отримують раз на добу, а з використанням вимірювальних хіміко-аналітичних лабораторій дані отримуються раз на тиждень.

На практиці значення питомої теплоти згоряння в точці відбору у споживача для розгалуженої системи з декількома джерелами моделюється за допомогою спрощених, припущених умов або станів, ігноруючи деякі складні характеристики самої системи. Ці

І.В. Рибіцький – <https://orcid.org/0000-0003-3596-3918>, О.М. Карпаш – <https://orcid.org/0000-0002-9240-1623>,

С.С. Войтенко – <https://orcid.org/0000-0003-4134-5964>, М.О. Карпаш – <https://orcid.org/0000-0002-4223-3828>,

П.М. Райтер – <https://orcid.org/0000-0002-3437-2844>, А.В. Яворський – <https://orcid.org/0000-0002-5970-4286>,

І.Р. Ващишак – <https://orcid.org/0000-0002-9078-6726>,

© І.В. Рибіцький¹, О.М. Карпаш, С.С. Войтенко, М.О. Карпаш, П.М. Райтер, А.В. Яворський, І.Р. Ващишак, 2025

обмеження не дозволяють реалізувати оперативне визначення динамічних змін величини теплотворної здатності природного газу з прийнятною точністю [3]. Відповідно єдине рішення полягає у вимірюванні значення питомої теплоти згоряння природного газу безпосередньо у споживача, що відповідає вимогам Закону України «Про ринок природного газу», який регламентує облік природного газу із застосуванням значення об'єму в одиницях вимірювання, що базуються на одиницях енергії.

Аналіз існуючих засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу показав [5], що основним недоліком згаданих технічних засобів є те, що їх подекуди неможливо, а в інших випадках – занадто дорого використовувати для вимірювання безпосередньо у кінцевого споживача, оскільки одні з них потребують для роботи розхідних матеріалів, інші – необхідності спалювання газової проби у великих обсягах, треті не дають змогу проводити вимірювання теплоти згоряння природного газу в мережах низького тиску.

Відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 15112:2020 теплоту згоряння природного газу можна визначати за прямими, непрямими та кореляційними методами, останні з яких на даний час значно розвинулись. Авторами проведено значний об'єм науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт з розроблення методу та виготовлення дослідного зразка приладу для експрес-вимірювання теплоти згоряння природного газу, який базується саме на кореляційному методі [6]. Проте саме похибка вимірювання даного приладу, яка складає 5 %, не дозволяє повноцінне його використання в якості комерційного засобу вимірювання.

Тому **метою** даного дослідження є розроблення удосконаленого методу та засобу вимірювання якості природного газу, зокрема його вищої та нижчої теплоти згоряння.

Аналіз проблем процесу експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу. Для

вирішення задачі оперативного визначення динамічних змін величини теплотворної здатності природного газу запропоновано експрес-метод вимірювання теплоти згоряння природного газу, що базується на алгоритмах штучних нейронних мереж [7] і використанні таких фізичних параметрів природного газу, як швидкість поширення ультразвукових коливань і вміст діоксиду вуглецю у пробі [6]. Даний метод дозволяє створювати засоби вимірювання, що дають можливість отримувати дані щодо теплоти згоряння в інтервалі часу до 15 хв без втрати природного газу в мережах низького тиску.

Ранні варіанти реалізації схемотехнічних і конструктивних рішень методу експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу підтвердили можливість здійснення самого процесу вимірювання та правильність самого підходу, проте вони мали суттєві недоліки, що значно підвищувало похибку вимірювання та обмежувало можливості самого методу. Зокрема при вимірюваннях не враховувалось реальне значення температури природного газу, нехтувалась похибка, спричинена «втратою півхвилі» ультразвукових сигналів та повною мірою не використані можливості блоку підсилення сигналів, реалізувавши тільки сталий коефіцієнт підсилення.

Реалізацію методу було здійснено у вигляді дослідного зразка приладу для експрес-контролю нижчої теплоти згоряння природного газу [6]. Даний прилад (рис. 1) виконано в зручному для транспортування пило- та вологозахищеному корпусі з класом захисту IP67. За допомогою розробленого приладу теплоту згоряння природного газу можливо контролювати в експрес-режимі з похибкою 4,1 %.

У приладі реалізовано принцип опосередкованого визначення нижчої та вищої теплоти згоряння природного газу на основі комплексного використання результатів вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань і концентрації

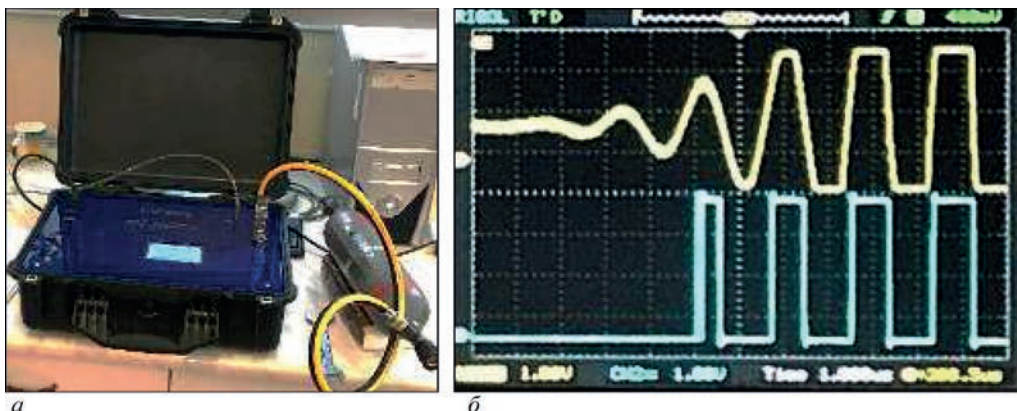


Рис. 1. Зовнішній вигляд удосконаленого приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу (а) та осцилограма ультразвукового луна-імпульсу для визначення швидкості поширення ультразвукових коливань у пробі природного газу (б)

діоксиду вуглецю у відібраній пробі природного газу за допомогою алгоритмів штучних нейронних мереж, які реалізовані в приладі програмно.

З метою удосконалення приладу та підвищення точності вимірювань були продовжені дослідження розробленого методу, за результатами яких встановлено, що вказане вище відносно велике значення похибки вимірювань теплоти згоряння природного газу за допомогою розробленого дослідного зразка приладу пов'язане з частковим нехтуванням реальним значення температури природного газу та неврахуванням похибки, яка має місце в процесі вимірювання часу проходження ультразвукових хвиль у середовищі, такої як «втрата півхвилі».

У перших варіантах приладу здійснювались вимірювання лише двох параметрів, таких як швидкість поширення ультразвукових коливань і вміст діоксиду вуглецю в пробі природного газу [7]. Такі параметри природного газу, як значення тиску та температура, приводились до нормальних умов. Це збільшувало час вимірювання однієї проби та похибку вимірювань, а також унеможлиблювало використання методу за температури навколишнього середовища, що значно (більш ніж на 10°C) відрізняється від нормальних умов. Виконані експериментальні дослідження показали, що значення швидкості поширення ультразвукових коливань в одній і тій же газовій пробі може змінюватись від 400 до 420 м/с (тобто на 5 %) за умов зміни температури природного газу від +5°C до +40°C.

Для виявлення характеру залежності швидкості ультразвукових коливань у природному газі від температури та значення самого температурного коефіцієнта було проведено багатократні вимірювання на різних пробах газу. Для цього було розроблено спеціальну експериментальну установку, яка дозволяла змінювати температуру проби природного в діапазоні +2 ... +80°C (рис. 2).

Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити температурний коефіцієнт швидкості ультразвукових коливань у природному газі, який складає 0,53 м/(с·°C) та встановити залежність приведення швидкості ультразвукових коливань у природному газі до нормальних умов за температурою:

$$v_0 = v - 0,53 \cdot (20^\circ\text{C} - t_0), \quad (1)$$

де: v_0 – швидкість ультразвукових коливань у пробі природного газу з температурою t_0 , v – швидкість ультразвукових коливань у тій же пробі природного газу за нормальних умов.

Наступним етапом досліджень був пошук рішень з метою зменшення впливу похибки, спричиненої «втратою півхвилі» ультразвукових сиг-

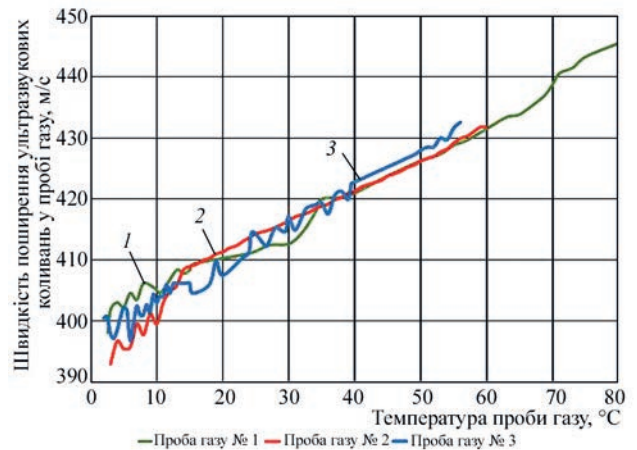


Рис. 2. Залежності швидкості поширення ультразвукових коливань від температури газу для трьох проб газу

налів у процесі вимірювання швидкості звуку в досліджуваній пробі газу. Частота ультразвукових коливань, які генеруються в пробі природного газу за допомогою спеціально розроблених п'єзоелектричних перетворювачів, складає 1 МГц. Луна-імпульс, який проходить через пробу природного газу, має форму кількох періодів синусоїдального сигналу (хвильового пакету), амплітуда якого від першого до наступних періодів спочатку наростає до певного максимального значення, яке залежить від коефіцієнта затухання ультразвукових коливань у природному газі, а потім спадає до нуля на ділянці останнього періоду хвильового пакету (рис. 1, б). Відлік моменту проходження ультразвукового імпульсу в природному газі здійснюється по фронту, коли амплітуда синусоїди при наростанні досягає певного значення. При цьому в перших варіантах приладу відлік здійснювався лише по додатних значеннях синусоподібного луна-імпульсу періоду сигналу.

Оскільки для різного складу природного газу є характерним різне значення коефіцієнта затухання ультразвукових коливань, то й швидкість наростання амплітуди синусоподібного луна-імпульсу буде різною, а отже, момент відліку може розпочатись не від першої півхвилі, а вже від другої півхвилі періоду сигналу. За таких умов похибка вимірювання швидкості складає більше ± 2 м/с (або більше 6 %). На рис. 3 наведено розраховану залежність похибки «втрати півхвилі» від відстані до ультразвукових п'єзоперетворювачів робочою частотою 1 МГц при вимірювання швидкості ультразвукових коливань у пробі природного газу.

Як бачимо з рис. 3, збільшення відстані між п'єзоперетворювачами призводить до зменшення похибки «втрати півхвилі». Проте оскільки величина затухання ультразвукових коливань у природному газі залежить від його густини та шляху про-

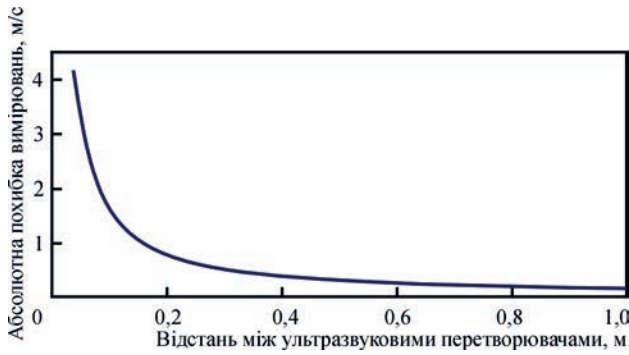


Рис. 3. Залежність «похибки втрати» півхвилі від відстані між перетворювачами

ходження коливань, то за певних значень відстані між п'єзоперетворювачами корисний луна-сигнал маскується шумами й виявити його практично неможливо. Виконане математичне моделювання та багатократні експериментальні дослідження показали, що вже при відстані більше 100 мм досить важко провести вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань у пробах природного газу, значення густини якого є меншим за $0,7 \text{ кг/м}^3$.

Тому з метою зменшення впливу похибки, спричиненої «втратою півхвилі» [8], запропоновано й реалізовано ряд схематехнічних та алгоритмічних заходів. На перший погляд, логічним рішенням є подача луна-сигналів ультразвукового давача, після їх підсилення/нормалізації за амплітудою, безпосередньо на вхід цифрового сигнального процесора для вимірювання часових інтервалів проходження ультразвукового сигналу через

ділянку вимірювальної камери з пробою природного газу. Проте детальні експериментальні дослідження форми луна-імпульсів ультразвукових сигналів у середовищі природного газу з різним його складом свідчать, що форма хвиль перших періодів хвильового пакету луна-імпульсу суттєво змінюється зі зміною складу природного газу. Тому це безпосереднього буде призводити до отримання неоднозначних результатів для різних складів природного газу, а отже, й до зростання невизначеності вимірювань швидкості поширення ультразвукових сигналів у них.

Удосконалення методу та засобу вимірювання для експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу. Суть схематехнічних рішень полягає в удосконаленні блоку підсилення та формування луна-імпульсу шляхом врахування при обробці значень як додатних, так і від'ємних півперіодів хвильового пакету синусоподібного луна-імпульсу, розробленні алгоритму змінного в часі коефіцієнта підсилення ультразвукових коливань [8], що пройшли крізь досліджувану пробу природного газу, а також алгоритму пошуку максимуму амплітуди синусоподібного луна-імпульсу (рис. 4).

На рис. 4, а зображено осцилограму хвильового пакету луна-сигналу ультразвукових коливань, які пройшли через пробу природного газу та були підсилені за допомогою інструментального підсилювача з низьким рівнем власних шумів AD600;

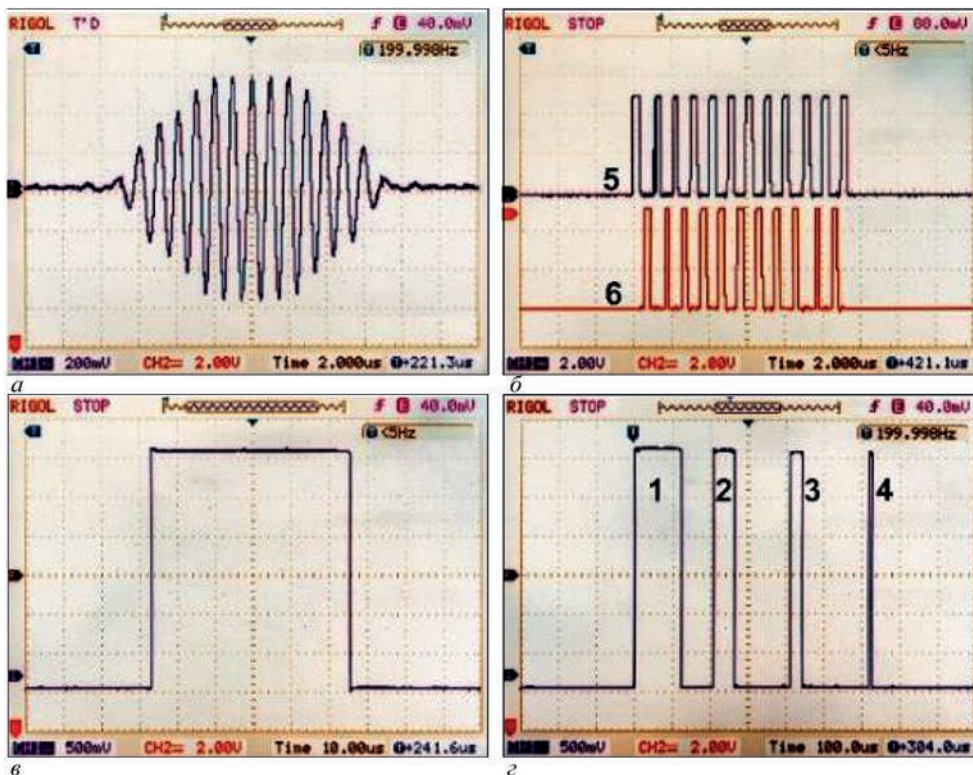


Рис. 4. Осцилограми, які ілюструють методу опрацювання інформаційних сигналів

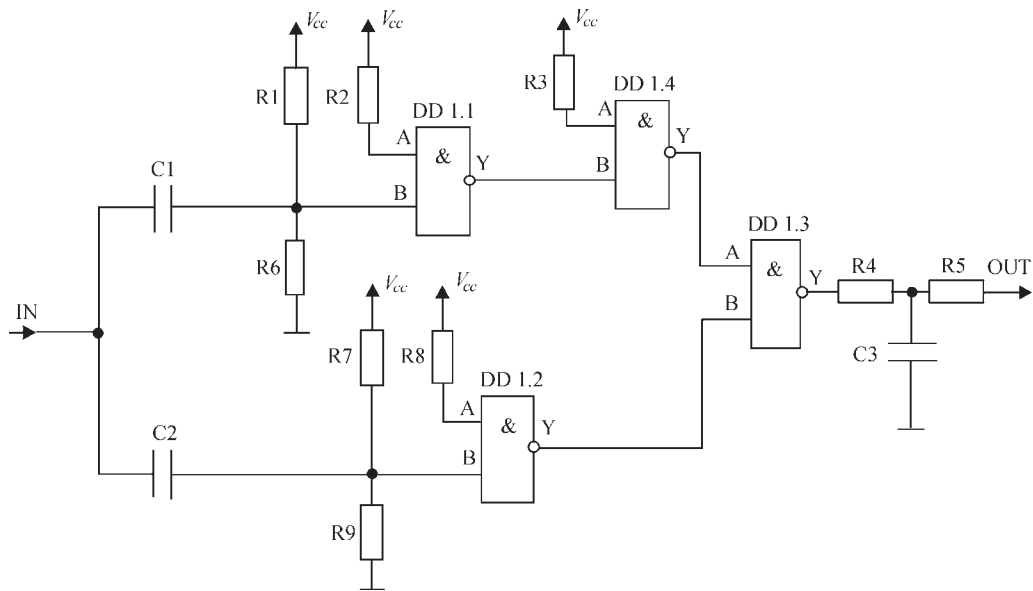


Рис. 5. Функціональна схема блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу

б – осцилограми луна-сигналу ультразвукових коливань, які пройшли через пробу природного газу та були опрацьовані за допомогою електронної схеми на базі тригерів: позначка 5 – додатні значення синусоїди (з додатних півперіодів синусоїдального сигналу), позначка 6 – від’ємні значення (з від’ємних півперіодів синусоїдального сигналу) синусоїди луна-сигналу; *в* – осцилограма після проведення підсумовування та інтегрування сигналів 5 та 6; *г* – 2, 3, 4 серія луна-сигналів, яка виникає через часткове відбиття від поверхні п’езоперетворювача, *л* – збуджуючий імпульс.

Розглянемо детальніше роботу функціональної схеми обробки луна-сигналів (рис. 5).

Блок інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу виконано на базі інтегральної мікросхеми 74НС00 фірми Philips Semiconductors, як містить збірку з чотирьох двовходових тригерів Шмідта з елементів типу І-НЕ: DD1-1 – DD1.4 (рис. 5). Тригер Шмідта є електронною моделлю двопозиційного релейного елемента, статична

характеристика якого має зону неоднозначності (петлю гістерезису, рис. 6, *а*). Перевагою тригера Шмідта є те, що він має прямокутну петлю гістерезису та дозволяє формувати чіткі прямокутні імпульси [9].

Елемент (або вентиль) І-НЕ (англ. Not AND, NAND) є логічним вентиляем, який реалізує операцію кон’юнкції з інверсією результату. Ця операція також носить назву «штрих Шефера». Активний сигнал («логічна 1», «істина») на виході цього вентиля присутній тоді, коли хоча б на одному його вході присутній пасивний сигнал («логічний 0», «хиба»). Лише коли на обох входах сигнал активний, на виході буде пасивний сигнал (рис. 6, *б*).

Принцип роботи розробленого блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу полягає в наступному. Луна-сигнал ультразвукових коливань, які пройшли через пробу природного газу та були підсилені за допомогою інструментального підсилювача з низьким рівнем власних шумів, потрапляє на вхід блоку інверсії, підсумовування та

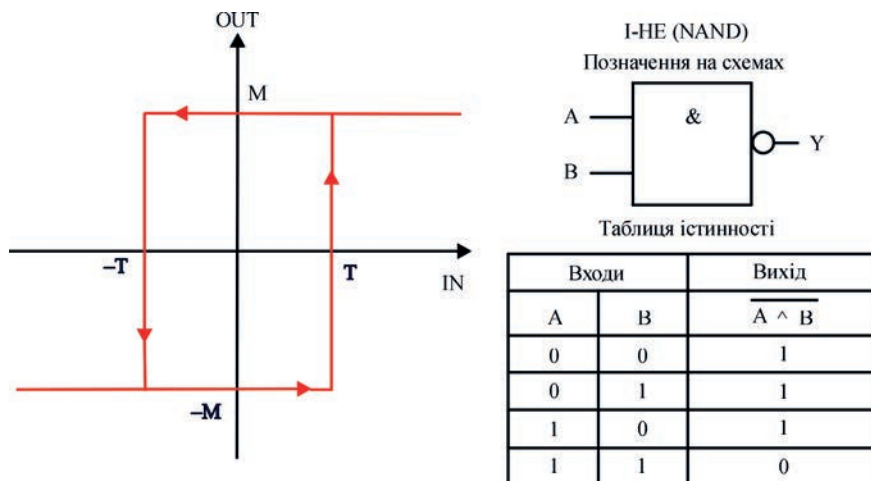


Рис. 6. Петля гістерезису тригера Шмідта (*а*) та функціональна таблиці елементу І-НЕ (*б*)

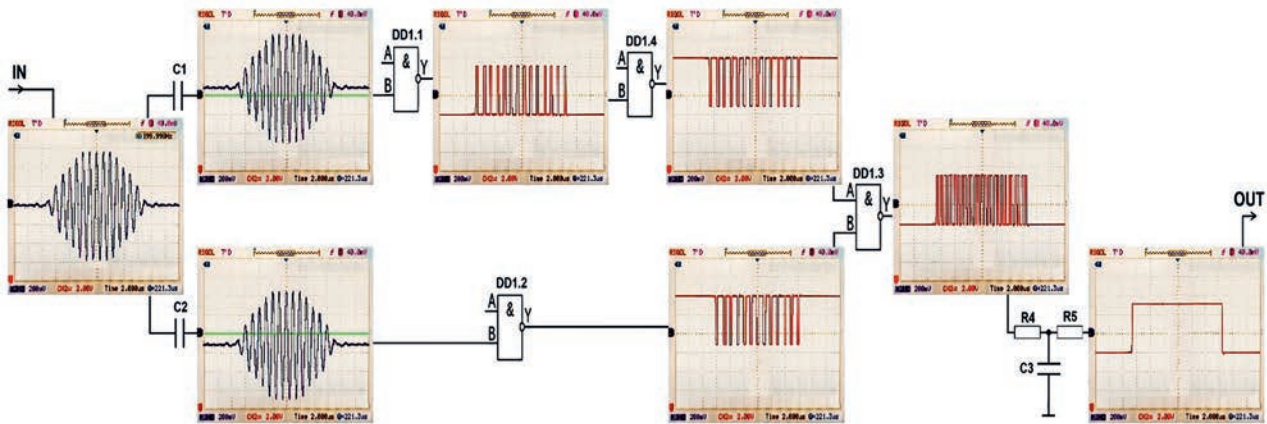


Рис. 7. Функціональна блок-схема блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу

інтегрування. Сигнал проходить паралельно через два конденсатори C1 та C2 (рис. 5), які призначені для вилучення з нього постійної складової напруги. Після конденсаторів сигнал паралельно поступає на два логічні елементи DD1.1 та DD1.2, які, за допомогою резисторів R1, R6 та R7, R9, що задають рівень спрацювання тригерів, налаштовані таким чином, що елемент DD1.1 реагує на появу лише додатної півхвилі луна-сигналу, а елемент DD1.2 – на появу лише від’ємної півхвилі. Оскільки за таких умов відбувається інверсія сигналу елементами тригера Шмідта, то рівень напруги елемента DD1.1, який сприймається як відсутність вхідного сигналу, буде мати значення 0 В, а рівень напруги, що визначає ситуацію наявності вхідного сигналу вказаного елемента, дорівнюватиме напрузі живлення V_{cc} . Для елемента DD1.2 маємо зворотну ситуацію – рівень відсутності сигналу на вході елемента буде за умови напруги на вході, що дорівнює V_{cc} , а рівень наявності на вході логічного елемента DD1.2 вхідного сигналу буде за умови значення напруги 0 В на його вході. Для приведення рівнів сигналу до одного логічного значення було введено логічний елемент DD1.4, який в даному випадку виконує функцію інвертора. Після приведення рівнів сигналу до одного логічного значення сигнали паралельно поступають на логічний елемент DD1.3, який в даному випадку виконує роль інвертора та суматора. Після інверсії та підсумовування сигнал поступає на інтегратор, виконаний за допомогою елементів R4, C3, R5. Осцилограму сигналу на виході з блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу показано на рис. 4, в.

Детальні осцилограми луна-сигналів на всіх етапах їх обробки за допомогою елементів DD1.1 – DD1.4 блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу наведено на функціональній блок-схемі (рис. 7).

На рис. 8 наведено зображення виготовленого та змонтованого в прилад блоку підсилення

та інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу.

Нормоване номінальне значення затримки розповсюдження сигналу від входу до виходу логічних елементів I-HE мікросхеми 74HC00 фірми Philips Semiconductors [9] складає (за напруги живлення 4,5 В) лише 9 нс, тоді сумарно три логічні елементи блоку інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу (рис. 7) призведуть до затримки поширення сигналу 27 нс.

Для отримання числових значень часових інтервалів між луна-імпульсами в середовищі природного газу та розрахунку теплотворної здатності газу (з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж) у приладі застосовано 16-ти бітний мікроконтролер (цифровий сигнальний процесор) PIC24HJ256GP610A фірми Microchip (США) і в останніх версіях приладу – новіший мікроконтролер dsPIC33FJ256GP710A [10]. Вказаний мікроконтролер містить на своєму кристалі швидкодіючий модуль порівняння-захоплення зміни вхідного сигналу (Input Capture module). Даний модуль дозволяє захоплювати передній або задній фронт вхідного імпульсу і з затримкою 62 нс почати підрахунок імпульсів внутрішнього тактового генератора

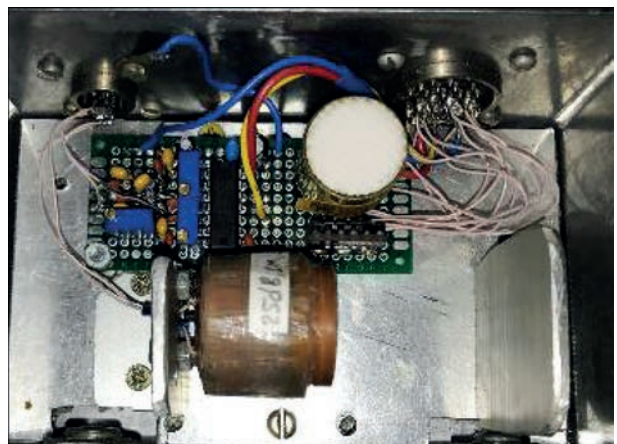


Рис. 8. Блок підсилення інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу

з частотою заповнюючих імпульсів 10 МГц і періодом 100 нс. Налаштування та функціонування даного модуля порівняння-захоплення відбувається з використанням розробленого системного програмного забезпечення. Швидкодіюча система опрацювання переривання такого мікроконтролера в поєднанні з оптимізованим кодом, написаним на мові асемблера мікроконтролера, дозволили за допомогою вказаних мікроконтролерів вимірювати часові інтервали між імпульсами з точністю 100 нс за умови максимальної стабільної затримки 124 нс. Враховуючи затримку поширення сигналу на блоці інверсії, підсумовування та інтегрування луна-сигналу 27 нс, сумарна затримка від моменту появи переднього фронту луна-сигналу на виході давача до початку підрахунку часу його появи мікроконтролером складатиме 151 нс. Враховуючи, що частота коливань у хвильовому пакеті луна-імпульсу 1 МГц, або період 1000 нс, то існує принципова можливість визначати не лише момент приходу переднього фронту першого імпульсу хвильового пакету луна-імпульсу, а й визначати момент приходу кожного переднього фронту кожного імпульсу хвильового пакету з затримкою 151 нс.

Як вище зазначалось, форма імпульсів хвильового пакету суттєво залежить від складу природного газу. Тому в процесі подальших удосконалень пристрою визначення теплотворної здатності з метою підвищення точності вимірювання швидкості поширення ультразвуку в середовищі планується використовувати як базову мітку не передній фронт першого імпульсу хвильового пакету, а час появи переднього фронту імпульсу хвильового пакету, що є в центрі хвильового пакету і його форма практично не залежить від складу природного газу проби. Це дає можливість забезпечити інваріантність вимірювання швидкості поширення ультразвукових імпульсів від складу природного газу в частині впливу на вимірювання форми сигналу луна-імпульсу.

Також удосконалення зазнав і генераторний блок приладу для вимірювання якісних характеристик природного газу (рис. 9), який призначений для формування високовольтного та височастотного імпульсу напруги для збудження п'єзоелектричного ультразвукового перетворювача.

Суть удосконалення генераторного блоку приладу для вимірювання якісних характеристик природного газу полягає в розробці схемотехнічних рішень, які забезпечили його роботу в імпульсному режимі тільки на момент проведення вимірювання, що підвищило потужність зондуючого імпульсу, значно скоротило енергоспоживан-

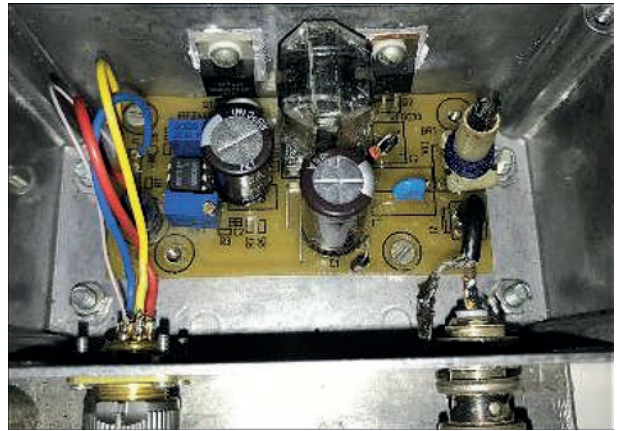


Рис. 9. Генераторний блок приладу для вимірювання характеристик природного газу

ня приладу та забезпечило можливість його довготривалої роботи автономно від акумуляторних батарей.

Урахування залежності швидкості ультразвукових коливань у природному газі від його температури, прийняті схемотехнічні та алгоритмічні заходи дозволили вдосконалити технологію вимірювання та сам прилад, зокрема: зменшився час вимірювання однієї проби, оскільки немає потреби догрівати чи охолоджувати пробу; розширились можливості використання приладу при різних діапазонах температури газу та навколишнього середовища, а також значно зменшилась похибка вимірювань (до 1 %) та стабільність і повторюваність результатів.

Загалом вказані вдосконалення дають можливість забезпечити інваріантність вимірювання швидкості поширення ультразвукових імпульсів від складу природного газу в частині впливу на вимірювання форми сигналу луна-імпульсу.

Висновки

У ході проведених досліджень запропоновано технічні рішення щодо вдосконалення засобу вимірювання для експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу, а саме:

1. Удосконалено метод експрес-контролю питомої теплоти згоряння природного газу, суть якого полягає в застосуванні ряду схемотехнічних рішень, які зменшують вплив похибки «втраати півхвилі» при ультразвукових вимірюваннях, а також реалізації алгоритму пошуку точки відліку акустичного сигналу.

2. Введена в алгоритм вимірювань залежність компенсації температури проби природного газу дозволяє проводити вимірювання як у побутових, так і в промислових умовах зі значенням похибки вимірювання основної енергетичної характеристики природного газу на рівні 1 %.

3. Реалізовано можливість вимірювання вищої теплоти згоряння природного газу, що відповідає вимогам Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії».

Список літератури/References

1. *Forbes: Natural Gas is Critical to Achieving Global Climate Goals. Here's Why*. <https://www.forbes.com/sites/kensilverstein/2024/09/09/natural-gas-is-critical-to-achieving-global-climate-goal-heres-why/>
2. ДСТУ EN 16723-1:2023 *Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу* (EN 16723-1:2016, IDT) [in Ukrainian].
DSTU EN 16723-1:2023. *Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection into the natural gas network. Pt 1. Technical characteristics of biomethane for injection into the natural gas network* (EN 16723-1:2016, IDT) [in Ukrainian].
3. *Кодекс газотранспортної системи* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#n18>
Code of the gas transport system [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#n18>
4. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2022, № 5, ст. 30. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1850-20#Text>
Law of Ukraine «On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Introduction of Accounting and Settlements on the Natural Gas Market by Gas Volume in Energy Units». *Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR)*, 2022, 5, 30 [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1850-20#Text>
5. 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*. Eds. by V. Babak, A. Zaporozhets. In: *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol 561. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_16, Print ISBN 978-3-031-68371-8.
6. Райтер П.М., Карпаш О.М., Яворський А.В. та ін. (2014) *Природний газ: інноваційні рішення для сталого розвитку* : монографія. Під заг. ред. О.М. Карпаша. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. ISBN 978-966-694-215-2
Reiter, P.M., Karpash, O.M., Yavorsky, A.V. et al. (2014) *Natural gas: Innovative solutions for sustainable development*: Monograph. Ed. by O.M. Karpash. Ivano-Frankivsk, IFNTUNG [in Ukrainian]. ISBN 978-966-694-215-2
7. Рибіцький І.В., Карпаш О.М., Карпаш М.О. (2020) *Моделювання можливості вимірювання вищої теплоти згоряння природного газу за наявних інформативних параметрів. Методи та прилади контролю якості*, 1(44), 147–154. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1\(44\)-147-154](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1(44)-147-154)
Rybitskyi, I.V., Karpash, O.M., Karpash, M.O. (2020) *Modeling the possibility of measuring the higher calorific value of natural gas using available informative parameters. Metody ta Prylady Kontroliu Yakosti*, 1(44), 147–154 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1\(44\)-147-154](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1(44)-147-154)
8. Карпаш О.М. (2010) *Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу*. Патент України на винахід 92846, МПК G 01 N25/20, G 01 N29/00. Заявка № а200905201 від 25.05.2009. Бюл. № 23/2010 від 10.12.2010.
Karpash, M.O. (2010) *Method for express-determination of heat of combustion of natural gas*. Patent UA, 92846 Int. Cl. IPC G 01 N25/20, G 01 N29/00 a 200905201, 10.12.2010 [in Ukrainian].
9. David, J., Cheeke, N. (2002) *Fundamental and Application of Ultrasonic Waves. CRC Series in Pure and Applied Physics*. CRC Press LLS.
10. Lokesh Soni, Neeta Pandey (2024) *A low power Schmitt-trigger driven 10T SRAM Cell for high speed applications. Integration*, 97, 102187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2024.102187>
11. *dsPIC33FJXXXGPX06/X08/X10. Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers, 2009 Microchip Technology Inc.* <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70286C.pdf>

I

IMPROVEMENT OF NATURAL GAS QUALITY CONTROLLING METHOD

I.V. Rybitsky¹, M.O. Karpash², S.S. Voitenko¹, O.M. Karpash¹, P.M. Raiter³, A.V. Yavorsky³, I.R. Vashchysk³

¹Kharkiv Ivan Kozhedub National University of the Air Force. 123 Poltavskyi Shliakh Str., 61123, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: info@hups.mil.gov.ua

²King Danylo University. 35 E. Konovaltsia Str., 76018, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

E-mail: university@ukd.edu.ua

³Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 15 Karpatska Str., 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

E-mail: admin@nung.edu.ua

The relevance of the issue of controlling the quality of natural gas, in particular its specific higher and lower calorific value, is currently primarily due to the requirements of the Law of Ukraine, which regulates the introduction of gas volume accounting and calculations in energy units on the natural gas market. The paper presents the results of research on improving the method of express control of the calorific value of natural gas, both higher and lower, that meets the requirements of the Law of Ukraine «On the Natural Gas Market». It is shown that the applied circuit and technical solutions allow significantly increasing the accuracy of measurement, realizing the possibility of measuring not only the lower, but also the higher calorific value of natural gas, as well as expanding the possibilities of using the implemented device in both industrial and domestic conditions. 11 Ref., 9 Fig.

Keywords: natural gas quality, measurement, ultrasonic vibrations, increasing accuracy, trigger, temperature dependence

Отримано 15.09.25

Отримано у переглянутому вигляді 03.11.25

Прийнято 12.12.25