

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Матіка Ф.Д.

на дисертацію Новицького Дмитра Володимировича

«Надвисокочастотний метод і засіб вимірювання вологості природного газу»

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Актуальність теми дисертації

Вимірювання вологості природного газу – одна із найважливіших задач оцінювання його якісних характеристик під час видобування, переробки та транспортування. Наявність водяної пари у природному газі призводить до: прискорення корозії трубопроводу та його арматури; утворення гідратів та конденсату; зменшення пропускної спроможності газопроводу; пошкодження фільтрів та компресорів, до збільшення вартості перекачування газу. З огляду на це, контроль вологості природного газу під час його транспортування є **важливим** та актуальним завданням.

Оскільки вміст вологи у газі характеризують різними фізичними величинами (абсолютна/ відносна вологість, молярна або об'ємна частка вологи, об'ємний вологовміст, температура точки роси), а також те, що умови транспортування не потребують повного видалення вологи з природного газу, для розв'язання окресленого вище завдання, існує багато методів та технічних засобів. На сьогодні одним із перспективних є *надвисокочастотний (НВЧ)* метод вимірювання вологи, який задовольняє переважну більшість вимог до методів вимірювання вологості газових сушей. Проте, основними недоліками вологомірів природного газу за цим методом, є відсутність точних математичних моделей перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та моделей НВЧ вимірювальних перетворювачів вологості газу.

Отже, завдання розвитку НВЧ методу вимірювання вологості природного газу, а також розроблення на основі удосконаленого методу НВЧ вологоміра, які вирішуються у дисертаційній роботі Новицького Д.В., є **актуальним**, а їх вирішення дає можливість підвищити точність вимірювання вологості природного газу.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Виконання роботи пов'язане з виконанням господарської теми з ПП «Кастор» (Вінниця), а саме «Розробка макета НВЧ вологоміра природного газу» (№ 4325 від 01.11.2018 р., № держреєстрації 0118U006655).

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, що містять 49 рисунків і 8 таблиць, висновків, списку використаних джерел (134 найменувань) та 10 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 168 сторінок, з яких основний зміст викладено на 143 сторінках.

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, показано зв'язок дисертації з науковими програмами, планами та темами університету, де виконана робота, визначено об'єкт та предмет досліджень, наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок здобувача в одержаних результатах, наведено відомості про їх апробацію та публікації.

У першому розділі проведено аналіз існуючих приладів та методів вимірювання вологості природного газу та визначено їх основні недоліки. За результатами цього аналізу встановлено, що найбільшого поширення набули такі методи вимірювання вологості газів – дієлькометричні, конденсаційні, електролітичні, ємнісні та мікровагові. Як результат розроблено класифікацію сучасних вимірювачів вологості газів за конструктивним виконанням, фізичними принципами, що покладені в основу вимірювальних перетворювачів. Як основну ознаку обрано фізичні чи хімічні явища, покладені в основу процесу перетворення, оскільки саме це зумовило різноманітність існуючих методів вимірювання та технічних засобів вимірювання вологості.

Також проаналізовано методи, які широко застосовують для вимірювання вологості природного газу та особливості застосування вологомірів. Зокрема, значну увагу відведено аналізу методів та засобів вимірювання вологості природного газу за температурою точки роси. Автором показано, що існуючі алгоритми вимірювання не забезпечують достатньої точності вимірювання вологості природного газу внаслідок складності детектування температури точки роси за вуглеводнями та вологою. За результатами аналізу надвисокочастотних (НВЧ) методів вимірювання автором вказано переваги дієлькометричного НВЧ методу та запропоновано застосувати саме його для розроблення засобу вимірювання вологості природного газу.

У другому розділі досліджено явище поглинання НВЧ випромінювання у газовому середовищі та обґрунтовано вибір хвильового НВЧ методу вимірювання вологості природного газу, за результатами вимірювання потужності сигналу сформованого при виникненні біжучої хвилі у хвильоводі.

Розроблено математичну модель НВЧ вимірювального перетворення вологості природного газу, суть якого полягає у вимірювання потужності НВЧ сигналу біжучої хвилі на виході хвильоводу, зміна якої відповідає вологості газу.

Досліджено залежності потужності біжучої хвилі від абсолютної вологості водяної пари при різних значеннях довжини проходження НВЧ сигналу у вологому середовищі з урахуванням температури та тиску. Встановлено, що із зростанням абсолютної вологості водяної пари потужність випромінювання спадає за експоненціальному закону. Довжина електромагнітної хвилі, а також відстань проходження НВЧ сигналу визначає поріг чутливості вимірювального перетворення вологості. За результатами моделювання досліджено додаткові похибки, що можуть бути спричинені впливом температури та тиску. На основі проведених досліджень розроблено структурну схему двоканального НВЧ перетворювача вологості природного газу.

Розроблено математичну модель двоканального НВЧ перетворювача вологості, за допомогою якої досліджено вплив діелектричної проникності газу

вимірювального та опорного каналів, а також значення температури природного газу. Показано, що наявність опорного каналу дає можливість підвищити точність вимірювання, оскільки двоканальна система нівелює нестабільність вхідного сигналу, що подається генератором, а також власні втрати потужності. Крім того, використання опорного каналу дає можливість знизити похибку вимірювання, оскільки діелектрична проникність газу незначно змінюється при зміні його складу.

У третьому розділі представлено результати розроблення засобу вимірювання вологості природного газу, основні принципи розроблення якого описані в другому розділі. Розроблено математичну модель вологоміра, яка враховує значення діелектричної проникності газу та містить коефіцієнти корегування за температурою. Також розроблені аналітичні залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик засобу вимірювання вологості газу, та розраховані теоретичні значення його інструментальної, методичної та загальної похибки (у підсумку встановлено, що загальна похибка вологоміра не перевищує 2,43 %).

Проведено дослідження вимірювальних каналів засобу вимірювання вологості природного газу з метою визначення впливу температури газу. В результаті підтверджено, що для підвищення точності вимірювання вологості природного газу необхідно у вимірювальній та порівняльній кюветах вологоміра встановлювати температурні давачі. Встановлено, що використання показника ослаблення сухого повітря, поправочного коефіцієнта при 0 °С і температурного поправочного коефіцієнта дозволяє з високою точністю компенсувати різницю діелектричної проникності сухого метану і сухого повітря. Похибка при зміні температури від 0 °С до 10 °С не перевищує 0,01 %, а відносна похибка Δt при відсутності корегування за температурою і при зміні температури повітря відносно 0 °С на +1 °С і -1 °С призводить до похибки $\pm 0,18$ %.

Також встановлено, що первинне градуювання такого вологоміра можна здійснювати за двома точками – за точкою "нуль" абсолютної вологості, і за точкою, що відповідає абсолютній вологості повітря в приміщенні, де проводиться градуювання.

Четвертий розділ присвячено розробці інженерної методики проектування НВЧ засобу вимірювання вологості газу, на основі якої розроблено функціональну та електричну принципову схеми, виготовлено експериментальний зразок засобу вимірювання вологості природного газу.

Розроблено алгоритми та програмне забезпечення для отримання та обробки вимірювальної інформації, що дало можливість до певної міри автоматизувати процес вимірювання та скоротити трудомісткість та затрати часу на отримання, обробку та зберігання інформації.

Розроблено методику експериментальних досліджень засобу вимірювання вологості газу та застосовано її для експериментальних досліджень цього засобу. Виконано експериментальне визначення похибки розробленого вологоміра у діапазоні значень абсолютної вологості повітря від 0,454...17,0 г/м³ та встановлено, що абсолютна похибка вимірювання вологості не перевищує 0,029 г/ м³, а похибка запропонованої математичної моделі

вологоміра не перевищує 7 %. Використовуючи задані значення калібрувальної системи Michell Dew Point Calibration System, підтверджено високу збіжність результатів дослідження, а також нормальний закон розподілу відносної похибки вимірювання вологості.

На основі порівняння характеристик розробленого вологоміра та існуючого потокового НВЧ вологоміра (розробник ВолгоУралНИПИ-газ) зроблено висновок про відповідність розробленого вологоміра поставленим вимогам, оскільки він дає можливість підвищити чутливість і точність вимірювання у порівнянні з названим аналогом.

Завершують роботу загальні висновки, список першоджерел та додатки, де представлено акти впровадження, залежності коефіцієнта поглинання від параметрів природного газу та інших показників, залежність абсолютного вмісту водяної пари у природному газі від зміни вихідної потужності для різної довжини хвильового тракту, вихідна характеристика математичної моделі двоканального НВЧ вимірювального перетворення вологості, результати експериментальних досліджень та закони розподілу контрольованої величини.

Матеріали, викладені у дисертаційній роботі, підтверджують що здобувач вирішив поставлені завдання та досяг мети дисертаційної роботи.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.

До найбільш значимих наукових результатів, що отримані у дисертаційній роботі, слід віднести:

1) удосконалену математичну модель перенесення НВЧ випромінювання в середовищі вологого газу, яка, на відміну від відомих, побудована з урахуванням розгляду загального коефіцієнта поглинання як суми коефіцієнтів поглинання природного газу та водяної пари при їх парціальних тисках і температурі, що дало можливість сформулювати підходи до удосконалення НВЧ методу вимірювання;

2) отримав подальший розвиток НВЧ метод вимірювання вологості природного газу, який на відміну від відомих, відрізняється тим, що значення вологості газу отримують на основі співвідношення показників поглинання природного сухого газу та водяної пари в результаті використання біжучої НВЧ хвилі певної довжини, що дає змогу реалізувати одноканальний та двоканальний вимірювальні перетворювачі вологості;

3) вперше отримано рівняння перетворення двоканального вимірювального перетворювача, яке однозначно пов'язує вихідну величину – співвідношення потужностей вимірювального та опорного каналів та вхідну – значення вологості, зведеної до нормальних умов;

4) отримала подальший розвиток математична модель НВЧ засобу вимірювання вологості, що дало змогу отримати рівняння перетворення, яке однозначно пов'язує вихідну величину – відношення напруг вимірювального та порівняльного каналів вологоміра та вхідні величини – значення абсолютної вологості та температури, що дало можливість отримати статичну характеристику перетворення й розробити принципово новий засіб вимірювання вологості;

5) розроблено аналітичні залежності для визначення інструментальної та методичної складових похибки вологоміра із врахуванням впливу параметрів стану вологого природного газу та основних конструктивних характеристик, що дало можливість розрахунковим шляхом оцінити похибку засобу вимірювання вологості під час його проектування та розроблення.

Практичне значення отриманих в дисертації результатів.

У роботі отримано ряд важливих для практики результатів, серед яких слід виділити такі:

- розроблено та впроваджено експериментальний зразок НВЧ засобу вимірювального вимірювання вологості, який відрізняється тим, що для підвищення точності вимірювання враховані поглинаючі властивості за певних довжин хвиль як для сухого газу, так і водяної пари; для діапазону вимірювання абсолютної вологості $0,454 \dots 30,37 \text{ г/м}^3$ (температура точки роси від -30 до $+30$ °C) максимальна зведена похибка не перевищує $2,43 \%$;

- розроблені та впроваджені окремі результати дисертаційної роботи у АТ «Харківгаз», зокрема, методика обчислення коефіцієнтів поглинання водяної пари та сухого газу, а також алгоритм температурної корекції, що дозволило підвищити точність вимірювання вологості природного газу;

- розроблено методику експериментальних досліджень нового засобу вимірювання вологості природного газу із застосуванням у якості зразкового засобу вимірювання вологості Michell Dew Point Calibration System, застосування якої дало можливість перевірити закон розподілу похибки вимірювання вологості, оцінити характеристики розподілу та зробити висновки про наявні систематичні та випадкові складові похибки вимірювання вологості;

- розроблено методику експериментального визначення показників поглинання природного сухого газу та водяної пари, а також експериментального вибору довжини хвилі джерела випромінювання як для сухого газу, так і для водяної пари.

Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації та достовірність отриманих результатів

Достовірність та обґрунтованість отриманих у роботі положень, наукових результатів, зумовлена виконанням теоретичних досліджень з використанням апарату метрології, теорії досліджуваних методів вимірювання, теорії похибок і обробки результатів вимірювань. Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується також доброю збіжністю результатів експериментальних досліджень і математичного моделювання, застосуванням методики експериментального визначення похибки розробленого засобу вимірювання вологості відносно зразкових високоточних систем вимірювання вологості. Достовірність результатів роботи підтверджується також їх впровадженням у конструкцію експериментального зразка вологоміра. Адекватність отриманих висновків та результатів підтверджено також їх апробацією на науково-технічних конференціях.

Повнота викладу матеріалів дисертації в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових публікаціях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України та одна стаття періодичному закордонному виданні, 7-х збірниках матеріалів і тез доповідей науково-технічних конференцій. Автор має один патент України на корисну модель.

Основні отримані у дисертаційному дослідженні результати представлені у наукових публікаціях та апробовані на науково-технічних конференціях. Особистий внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, є визначальним.

Обсяг опублікування результатів роботи відповідає вимогам «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167.

Відсутність порушення академічної доброчесності

В процесі опрацювання дисертаційної роботи та наукових публікацій, зарахованих за темою дисертації порушень академічної доброчесності не виявлено. Зокрема не виявлено академічного плагіату, елементів фабрикації та фальсифікації. По всьому тексту дисертаційної роботи автором застосовано посилання на його наукові публікації, публікації інших авторів, нормативні документи та інші джерела.

До недоліків дисертації слід віднести:

1. Для математичної моделі вимірювального перетворювача вологості природного газу на основі НВЧ методу біжучої хвилі, що представлена рівнянням (2.17) слід було б зазначити діапазони параметрів, за яких ця модель є адекватною. Також доцільно було б вказати, яку додаткову похибку спричинить спрощення моделі (2.17) до виду (2.18) за допомогою введення поправкового коефіцієнта поглинання сухого газу $K_{с.г.}$.
2. З матеріалу підрозділу 2.3 не зрозуміло як параметри електричної схеми заміщення, представленої на рис.2.15, пов'язані з параметрами вологого газу та для яких параметрів стану газової суміші автор отримав результати моделювання за моделлю на основі еквівалентної схеми та за моделлю (2.17), що представлені на рис.2.18. Чи зазначене відхилення між моделями 3% відповідає області зміни параметрів стану вологого газу?
3. У підрозділі 3.1 (стор.65) вказано, що для опрацювання сигналів у схемі вологоміра застосовано 8-ми розрядний мікроконтролер ATMEGA328P. У підрозділі 3.6 підтверджено, що похибка квантування за рівнем 8-бітного АЦП становить 0,4%. Не зрозуміло, чому застосовано контролер з такою значною похибкою АЦП перетворення, яка у декілька разів перевищує похибку вимірювання тиску та температури.
4. У розділі 2 (підрозділ 2.2, рис. 2.5) показано, що тиск газу також значно впливає на коефіцієнт поглинання водяної пари, що міститься у газі. Однак

під час аналізу похибок вимірювального перетворювача вологості (підрозділ 3.6) мало уваги надано впливу тиску на похибку результату вимірювання вологості газу.

5. В тексті дисертації присутні стилістичні та граматичні неточності, зокрема скорочення, розшифрування яких не дано у тексті дисертації (АПЧ, ВЕХ, ЗКВПГ).
6. В тексті дисертації зустрічаються неточності нумерування рисунків, на рисунках 2.11 та 2.12 некоректне позначення розмірної одиниці вологості.
7. В роботі застосовано різні одиниці вимірювання температури (градус Цельсія та Кельвіна) тиску (атм., Па, мм.рт.с) інших величин. Доцільно було б застосувати одиниці системи СІ чи похідні від них.

Однак вказані зауваження не зменшують значимості отриманих у роботі наукових і практичних результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

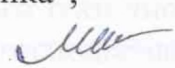
Висновок.

Дисертація Новицького Д.В. «Надвисокочастотний метод і засіб вимірювання вологості природного газу» є завершеною науковою працею, що містить нові та практично цінні результати. Матеріал дисертації викладено чітко та послідовно із застосуванням наукової і технічної термінології відповідних галузей знань.

Зміст дисертаційної роботи відповідає спеціальності 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», за якою вона подана до захисту.

Дисертаційна відповідає вимогам п. 9-12 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167, а здобувач Новицький Дмитро Володимирович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Офіційний опонент,
професор кафедри автоматизації
та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національного університету «Львівська політехніка»,
докт. техн. наук, професор

 Ф. Д. Матіко

Підпис професора, д.т.н. Матіка Ф. Д. засвідчую.

Вчений секретар Національного університету
«Львівська політехніка»



 Р.Б. Брилинський