

**СЕКЦІЯ 8**  
**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.**  
**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБЛІКУ**  
**ЕНЕРГОНОСІЇВ**

УДК 621.311

**USING OF ASCA WITH LOCAL DATA LOGGER FOR THE HARMONIC'S  
SOURCES IDENTIFICATION**

*Filyanin D., Kalinchyk V., Zhuravlow A.*

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

*E-Mail: [daniel\\_f@rambler.ru](mailto:daniel_f@rambler.ru), [vkalin@i.ua](mailto:vkalin@i.ua), [aazhur@ukr.net](mailto:aazhur@ukr.net)*

One of the most important components of the electricity market is its instrumental support. It is a set of systems, devices, communication channels, algorithms, etc. for monitoring and controlling the parameters of energy consumption and power supply. The base of the formation and development of instrumental support are automated systems of commercial account of electric power (ASCA).

The main component of modern ASCA is multifunctional electronic energy meter with current and voltage transformers. The counters measure, registers and accumulates data on consumption and generation active and reactive energy and apparent energy. Also, modern electronic counters have a functions of energy quality analysis.

Most modern electronic counters are designed with applying ICs Analog Devices. Among them there are ICs with the possibility monitoring power quality parameters, in particular, the calculation of THD (Total Harmonic Distortion). For example, ADE9000 and the family ADE78xx. Its functionality includes the availability of a flexible buffer for storing samples of current and voltage signals for the purpose of further processing by external digital signal processor (DSP). The buffer stores from 8 to 80 ms of information depending on sampling rate. For data transfer to an external signal processor, a special interface HSDC (High Speed Data Capture) is provided. A DSP is integrated in the energy counters ICs, but its capabilities are limited [1].

Primary counting of power and energy of higher harmonics is carried out in counters installed at all points of connection of elements of the distribution system (DS), according to the algorithm [1].

The identification of sources of harmonic distortion and determination the degree of participation of DS elements in the power distribution of higher harmonics start off in the data logger with the function of calculating the power of higher harmonics for the "transit" DS elements (transformers, cable lines).

The flow-chart of the algorithm for calculating the power of higher harmonics for "transit" DS elements is shown at Fig. 1.

The higher harmonic power and energy values obtained from the meters are processed. Next, a report is generated, on the basis of which adjusted bills for

electricity payment are compiled, taking into account the tariff coefficients for the generation / consumption of energy of higher harmonics. Also, based on the calculated data on the power graphs of higher harmonics at various points of the DS, a list of arrangements is being developed to improve the power quality.

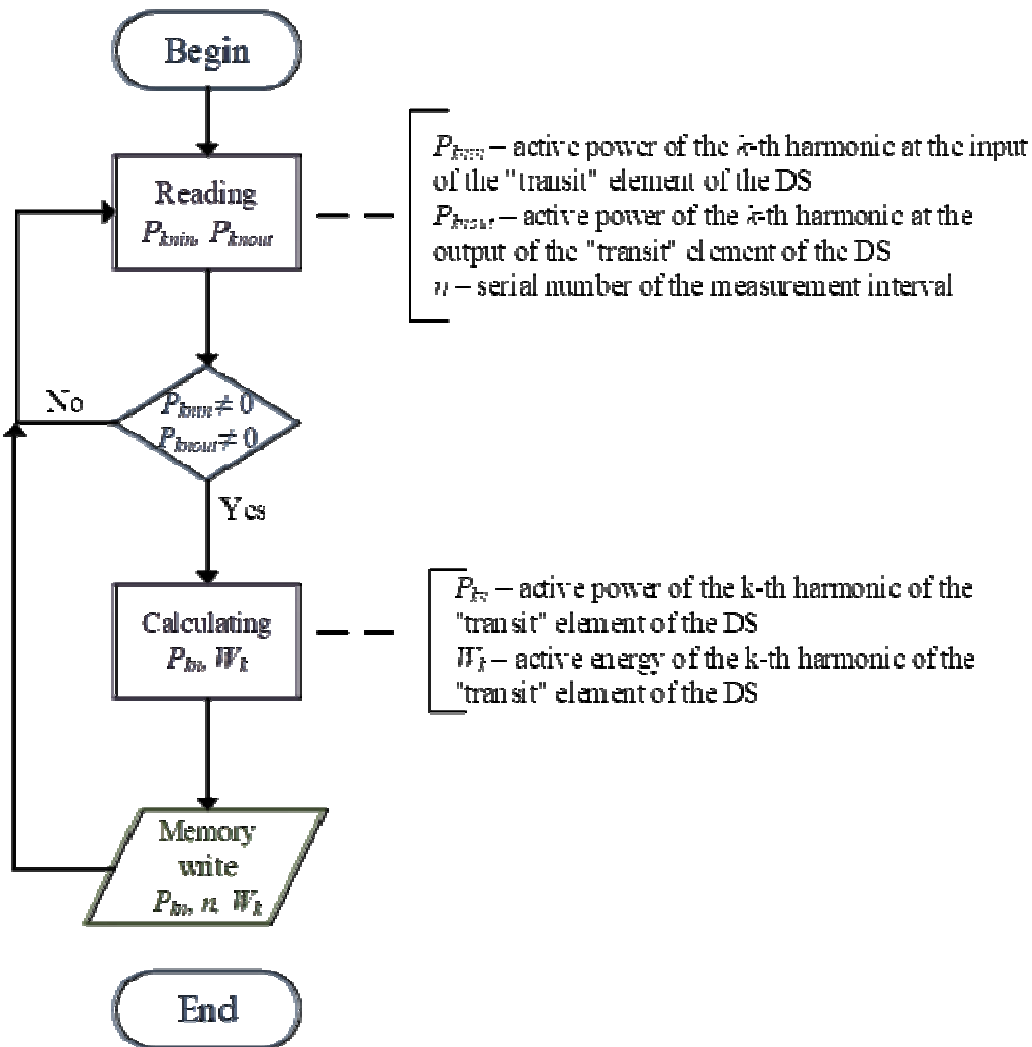


Fig. 1. Flow-chart of the algorithm for calculating the power of higher harmonics for "transit" DS elements [2]

**Keywords:** ASCA, data logger, nonsinusoidal conditions, power quality, harmonics, identification of distortion sources.

**References**

- [1] D. Filyanin, "Using of ASCA for the harmonic's sources identification", на XIX Міжнар. наук.-техн. конф. ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, Київ, 2020, с. 150–151.
- [2] Д. В. Филяннн, «Применение автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии для решения задач идентификации и оценки источников гармонических искажений», Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, № 4 (111), с. 23–28, 2018.

УДК 621.311.001.57(063)

## ДІАГНОСТИКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

*Закладний О. О.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [zakladniy@gmail.com](mailto:zakladniy@gmail.com)*

Найбільший вплив на раціональне використання електроенергії підприємством спричиняє енергоефективність електромеханічної системи (ЕМС) як основного споживача. У проектуванні технологічного процесу, під час вибору ЕМС зазвичай не приділяється уваги її енергоефективності протягом усього строку служби. Але повинні розглядатися не просто режим завантаження ЕМС і не лише її робочі характеристики та енергоефективність на даний момент – слід здійснювати оцінювання економічності за весь термін служби.

Ефективність енергозберігаючих заходів значною мірою визначається енергоефективністю ЕМС, і нині вона лишається низькою. В літературі з питань енергоефективності ЕМС пропонуються проекти з енергозбереження, але їх реалізація потребує значних коштів.

На сьогодні виникла необхідність застосування нових технічних рішень і наукових підходів до вирішення проблеми підвищення рівня енергоефективності ЕМС.

Енергоефективність ЕМС на сьогодні оцінюється аперіодично, наприклад, під час проведення енергетичного аудиту. Тому актуальним завданням є безперервний постійний контроль споживання електроенергії ЕМС шляхом діагностики її енергоефективності як складова системи енергетичного менеджменту на підприємстві.

Дотепер в енергетичному менеджменті деталізоване управління раціональним використанням енергії не поширювалося на конкретного технологічного споживача, його режими роботи. В першу чергу розглядалось підприємство в цілому або окрема технологічна лінія. Контроль конкретного обладнання, наприклад, ЕМС, не був постійним і безперервним та відбувався за фактом, а не в реальному часі, коли неефективне споживання електроенергії мало місце значний проміжок часу.

Останнім часом енергетичний менеджмент набув нових рис, а саме, – він став поширюватися на кінцевого споживача. Це є новим стандартом у методології енергетичного менеджменту – запроваджується високий ступінь деталізації, контроль енергетичної ефективності ЕМС і, відповідно, – оперативне реагування на погіршення енергоефективності. Ці зміни пов'язані з постійним удорожчанням електричної енергії, коли основна складова вартості життєвого циклу ЕМС – витрати на електричну енергію – становлять в середньому 85 % від усіх витрат за термін експлуатації.

В результаті багатьох чинників, зокрема таких, як робота ЕМС з недовантаженням, неякісна мережа живлення, недостатнє технічне обслуговування, нераціональне керування технологічним процесом, впливу випадкових факторів – реальне споживання енергії завжди відрізнятиметься від ідеального. Контроль та оцінка вказаних розходжень між ідеальним та фактичним споживанням енергії і є головним завданням енергетичного менеджменту ЕМС. Сам собою контроль не зекономить енергію, але з його допомогою енергетичний менеджер може визначити, де і коли слід вжити коригуючих дій для усунення неефективного її використання. Такий підхід дозволяє оцінювати стан ЕМС на всіх етапах її життєвого циклу від введення в експлуатацію до списання.

У відповідності до світових стандартів, європейських нормативних актів та довідкової літератури стосовно підвищення рівня енергетичної ефективності, відоме правило енергоменеджменту – «Не вмієш вимірювати – не зможеш управляти» означає, що оцінювання енергетичних показників є фундаментом енергетичного менеджменту. Таким чином, підходи, які забезпечують контроль області високої енергетичної ефективності споживачів за рахунок моніторингу енергетичних показників, є необхідною складовою модерної системи енергетичного менеджменту. Такі засоби, розроблені у відповідності до принципів сучасних розумних технологій, дозволять впровадити на підприємстві систему енергоменеджменту відповідно до міжнародного стандарту ISO 50001:2018.

Для визначення енергоефективності ЕМС застосовуються енергетичні показники - енергія, яка споживається з мережі за цикл роботи, питомі витрати енергії на одиницю продукції, сумарні втрати енергії. В деяких випадках застосовується безпосередньо критерій максимального ККД, оптимального імпедансу тощо. Однак не існує загальноприйнятого критерію енергоефективної роботи ЕМС.

Неврахування зв'язків між процесами перетворення енергії та їх наслідками є істотним недоліком існуючих засобів діагностування ЕМС. Воно не дозволяє встановити причини, які призводять до погіршення енергоефективності, виникнення і розвитку несправностей та аварій. Існує взаємозв'язок між якістю електроенергії, режимом навантаження, процесами перетворення енергії та технічним станом ЕМС.

Оцінювання енергоефективності ЕМС є комплексним завданням з великою кількістю характеристик і факторів, які на нього впливають (навантаження, якість живильної напруги, технічний стан тощо). Основним показником ефективності роботи в енергетичному аспекті вважається ККД системи в цілому. Однак для комплексної оцінки енергоефективності важливі також коефіцієнт потужності, електроенергія, яка споживається протягом життєвого циклу і значення складових втрат.

Енергоефективність ЕМС прямо пов'язана з її технічним станом. Несправність механізму, наприклад, насосної установки та порушення

технологічного режиму (заклинювання підшипників, проривання напірного трубопроводу тощо) призводить до зміни навантаження. З іншого боку, двигун може знаходитися у стані прихованої відмови задовго до відпрацювання ним нормативного ресурсу. У цих випадках, а також у разі погіршення якості напруги живлення, знижуються ККД і коефіцієнт потужності двигуна.

Процес ефективного використання (перетворення) енергії ЕМС визначається двома базовими складниками: енергоспоживання та енерговикористання (перетворення) спожитої енергії, що відповідає принципіальному представленню параметру «рівень енергоефективності» у міжнародному стандарті ISO 50001:2018.

Автором пропонується використання критеріїв енергоефективності - ККД та коефіцієнта потужності для визначення енергетичного і технічного станів ЕМС у залежності від режиму навантаження та якості електричної енергії. Оцінювання енергетичного стану ЕМС відбувається порівнянням фактичних показників з їх еталонними значеннями, тобто шляхом аналізування та порівняння параметрів енергетичної ефективності з енергетичною базовою лінією. У відповідності до ISO 50001:2018 цей процес є частиною енергоаналізу – оцінювання рівня енергоефективності на основі вимірних показників та довідкової (паспортної) інформації, що дозволить визначити заходи для його покращення. Методика контролю енергоефективності повністю відповідає процедурі енергоаналізу, яка регламентована стандартом ISO 50001:2018.

Запропоноване рішення полягає в контролюванні у реальному часі енергоефективності ЕМС засобами функціонального діагностування, обслуговуванні за фактичним станом та безперервному захисті під час експлуатації. Математичний апарат діагностування поєднує методи аналізування миттєвих значень струмів і напруг електропривода, температури доквілля й дозволяє визначати енергетичний і технічний стан ЕМС та прогнозувати залишковий ресурс, з методом спектрально-струмового аналізу, що надає можливість завчасного виявлення механічних ушкоджень двигуна та пов'язаного з ним механізму. Створені програмно-апаратні засоби діагностування енергоефективності ЕМС - моделі, методики, алгоритми, програми та схемно-технічні рішення враховують дію експлуатаційних впливів - якість напруги живлення, режим навантаження і температуру доквілля.

Методи та засоби діагностики енергоефективності дозволяють впровадити сучасні інформаційні smart-технології у систему енергетичного менеджменту підприємства та автоматизувати виконання таких складових стандарту ISO 50001:2018, як встановлення енергетичної базової лінії, індикаторів енергоефективності, здійснення моніторингу та необхідних вимірювань для визначення рівня енергоефективності, проведення енергоаналізу, енергопланування та формування технічних звітів тощо.

*Ключові слова:* енергоефективність, електропривод, енергетичний менеджмент, діагностика, технічний стан, smart-технології.

УДК 681.121.42

## АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВОДОМІРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Гришанова І. А.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [irgryshanova@gmail.com](mailto:irgryshanova@gmail.com)*

Перспективним напрямом проектування й аналізу конструктивних особливостей витратомірів є застосування сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій, що зокрема базуються на кінцевоелементному аналізі. У витратометрії здебільшого використовуються CFD технології (технології обчислювальної гідродинаміки). Якщо раніше теоретичний аналіз роботи витратомірів не дозволяв врахувати всі особливості течії рідини або газу та їхньої взаємодії з первинними вимірювальними перетворювачами, то тепер це стало можливим саме завдяки чисельним експериментам, основою яких є математичні моделі потоків і конструкцій витратомірів.

В даному дослідженні акцент зроблено на можливих шляхах збільшення точності існуючих ультразвукових водомірів час-імпульсного типу. Враховуючи їхні криві похибок, можна прийти до висновку, що вони нелінійні, мають невисокий рівень повторюваності, а отже їх доволі важко скорегувати, використовуючи лише одну поліноміальну залежність. Як правило, суттєві розбіжності в показаннях водомірів мають місце при числах Рейнольдса нижче  $5000 \div 7000$ , а це якраз перехідна зона від ламінарного до турбулентного режиму. Для того, щоб краще зрозуміти цей феномен, була ретельно проаналізована гідродинамічна картина всередині коаксіальних ультразвукових витратомірів на базі програмного забезпечення ANSYS CFX. Виявлено, що задіяний алгоритм розрахунку градувального коефіцієнту є дуже спрощеним, оскільки не враховує особливості течії та її взаємодії зі струмовипрямлячем, ультразвуковими датчиками або віддзеркалюючими елементами. Цей алгоритм також не враховує стан потоку на вході до водоміра, який може бути асиметричним, мати завихрення та пульсації.

Для того, щоб покращити вже існуючі конструкції ультразвукових водомірів було запропоновано певні зміни, які призвели до усунення рециркуляційних зон і зон розділення потоку, що негативно впливали на стабільність метрологічних характеристик. В результаті точність досліджуваних ультразвукових витратомірів зросла. Це було підтверджено реальними експериментальними дослідженнями на зразковому обладнанні, а також дослідженнями в польових умовах.

Моделювання однак не завжди показує збіг з реальними кривими похибок, отриманими на калібрувальному устаткуванні в усьому діапазоні вимірювань.

Особливо це очевидно в перехідному режимі, якого слід уникати різними можливими способами.

Взагалі кажучи, важко екстраполювати теоретичні залежності або залежності, властиві конструкції одного приладу, на інші. Отже, застосування типової залежності для градувального коефіцієнта призводить до похибок вимірювання. До речі, зрозуміло, що це спрощення спрацьовує лише тоді, коли спотворення потоку не є серйозними. Таким чином, чим більше збурення в потоці, тим більш некоректним є запропоноване наближення теоретичної залежності градувального коефіцієнта до реальної. Одним із можливих способів поліпшення ситуації є вибір правильної конфігурації випрямляча потоку. Це дійсно допомагає досягти суттєвої повторюваності характеристик вже існуючих ультразвукових водомірів в широкому діапазоні витрат, який одночасно охоплює ламінарну, перехідну і турбулентну зони.

Дослідження, проведені в рамках цієї роботи, підтвердили висновок про можливість розрахунку метрологічних характеристик ультразвукових витратомірів із достатнім ступенем точності, а також оптимізації їхніх конструкцій, використовуючи сучасні комп'ютерно-інтегровані технології.

*Ключові слова:* ANSYS, CFD, ультразвуковий водомір, час-імпульсний принцип вимірювання, градувальний коефіцієнт.

УДК 681.125

## ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

*Биць О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В.*

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна*

*E-mail: [oksana.slabyk@gmail.com](mailto:oksana.slabyk@gmail.com), [fmatiko@gmail.com](mailto:fmatiko@gmail.com)*

Вимірювання кількості теплової енергії виконують непрямим методом на основі обчислених значень параметрів теплоносія (зокрема ентальпії) і вимірних значень параметрів потоку. Тому для оцінювання невизначеності кількості теплової енергії насамперед необхідно оцінити невизначеність застосованих методик розрахунку параметрів теплоносія, а також невизначеність вимірюваних значень параметрів потоку (температури, тиску, витрати).

Результуюча залежність для оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії має базуватись на рівнянні обчислення кількості теплової енергії, яке реалізоване у автоматизованій системі вимірювання, а також враховувати невизначеності усіх складових цього рівняння:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_{m1} h_1 dt - \int_{t_0}^{t_k} q_{m2} h_2 dt , \quad (1)$$

де  $W$  – кількість теплової енергії, яку передано від джерела або отримано

споживачем;

$q_{m1}, q_{m2}$  – масова витрата теплоносія, відповідно у подавальному та зворотному трубопроводах;

$h_1, h_2$  – питома ентальпія теплоносія у подавальному і зворотному трубопроводах;

$t=t_k - t_0$  – інтервал часу обчислення кількості теплової енергії.

Застосувавши підходи ISO 5168 [1] для оцінювання комбінованої стандартної невизначеності кількості теплової енергії, яку обчислюють за рівнянням (1), отримано таке рівняння:

$$u'_w = \sqrt{u'^2_{\tau} + C_1^2 u'^2_{q_1} + C_2^2 u'^2_{h_1} + C_3^2 u'^2_{q_2} + C_4^2 u'^2_{h_2}}, \quad (2)$$

де  $u'$  – невизначеність вимірюваного значення інтервалу часу, протягом якого обчислюють кількість теплової енергії;

$u'_{q_1}, u'_{q_2}$  – невизначеності результатів вимірювання витрати теплоносія відповідно у подавальному та зворотному трубопроводах;

$u'_{h_1}, u'_{h_2}$  – невизначеності результатів вимірювання ентальпії теплоносія відповідно у подавальному та зворотному трубопроводах;

$C_1, C_2, C_3, C_4$  – коефіцієнти впливу, які слід обчислювати за формулами:

$$C_1 = \frac{\partial f}{\partial q_1} \frac{q_1}{W} = \frac{h_1 q_1}{W}; \quad C_2 = \frac{\partial f}{\partial h_1} \frac{h_1}{W} = \frac{q_1 h_1}{W}; \quad C_3 = \frac{\partial f}{\partial q_2} \frac{q_2}{W} = -\frac{h_2 q_2}{W}; \quad C_4 = \frac{\partial f}{\partial h_2} \frac{h_2}{W} = -\frac{q_2 h_2}{W}.$$

Відносну розширену невизначеність результату вимірювання кількості теплової енергії за 95 % довірчого рівня слід обчислювати за формулою [2]:

$$U'_w = 2u'_w. \quad (3)$$

Отже, оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії за допомогою системи вимірювання на основі витратомірів змінного перепаду тиску, яка реалізує рівняння (1), пропонується виконувати за такою методикою:

1) обчислити невизначеність результату вимірювання витрати теплоносія відповідно у подавальному  $u'_{q_1}$  та зворотному  $u'_{q_2}$  трубопроводах за рівнянням [3]:

$$u'_q = \left\{ u'^2_c + u'^2_{K_m} + u'^2_{K_n} + \left( \frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 u'^2_D + \left( \frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 u'^2_d + 0,25(u'^2_{\Delta p} + u'^2_p) \right\}^{0,5}, \quad (4)$$

де  $u'_c$  – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання коефіцієнта витікання;  $u'_{K_m}$  – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу (ВТ);  $u'_{K_n}$  – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання поправкового коефіцієнта, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми;  $\beta$  – відносний діаметр отвору



звужувального пристрою (ЗП);  $u'_D$  – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання внутрішнього діаметру ВТ або вхідної частини труби Вентурі за робочої температури середовища;  $u'_d$  – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання діаметру отвору ЗП за робочої температури середовища;  $u'_{\Delta p}$  – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання перепаду тиску на ЗП;  $u'_\rho$  – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання густини середовища;

2) обчислити невизначеність ентальпії теплоносія відповідно у подавальному  $u'_{h1}$  та зворотному  $u'_{h2}$  трубопроводах;

3) обчислити значення комбінованої стандартної невизначеності кількості теплової енергії за рівнянням (2);

4) за формулою (3) обчислити значення відносно розширеної невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії.

Запропоновані авторами підходи дають можливість розробити залежності для оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії для систем різної конфігурації, які реалізують рівняння вимірювання відмінні від рівняння (1).

Розроблене рівняння (2) може бути застосоване для оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії для систем з витратомірами та лічильниками теплоносія різних типів.

*Ключові слова:* кількість теплової енергії, теплоносій, невизначеність, система вимірювання.

#### **Література**

- [1] ISO 5168:2005 Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties.
- [2] JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, First edition, September 2008.
- [3] ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань. [Чинний від 01.04.2010]. Київ, Україна: Держстандарт України, 2010.

УДК 681.121

### **AUTOMATED SYSTEM FOR TRANSMITTING READINGS OF METERING INSTRUMENTS FOR AN APARTMENT BUILDING**

*Anna Pysarets*

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
Kyiv, Ukraine*

*E-mail: [anna.v@ukr.net](mailto:anna.v@ukr.net)*

Energy carriers metering units are characterized by a variety of meter models that are produced by many manufacturers around the world. There is a problem of periodically taking readings of operating energy carriers metering instruments (water,

gas, etc.) because of their huge number. Error-free and timely fixation of measuring instruments readings is possible in the case of creating automated systems for their transmission.

Automated systems for transmitting readings from metering instruments can be classified into wired, wireless and combined, depending on the technologies that are used and the transmission media that create the channel.

The characteristic features of wired data transmission technologies are high interference immunity and data security, high reliability and independence from weather conditions. In this case, physical access to equipment or buses is required to access information.

In turn, wireless technologies (radio equipment operating in free frequency bands, Wireless M-Bus, LoRaWAN, NB-IoT) are characterized by quick and easy deployment, as well as a significant reduction in time and financial costs at the design, deployment and operation stages of the network.

The choice of technology for recording and transmitting data from metering units is determined by the number of instruments at the object and the specifics of their operating conditions.

The initial assessment of the automation object provides for a study of the using possibilities both wired and wireless data transmission technologies.

For the deployment of wired transmission systems, the cable routing physical feasibility is evaluated. In the case of using wireless technologies, the locations of installation of radiomodules and repeaters (if necessary) are determined and the radio signal level is measured at the place where data is supposed to be received from metering instruments.

As a result of the object initial assessment, the economic feasibility of the considered options is calculated and their comparison is carried out.

Using wireless technologies, this parameter significantly affects the frequency of service, that is, the need to replace the battery in repeaters and radiomodules.

Consider the creation of an automated system for transmitting readings using the example of a multi-apartment building. Variants of such system structure are possible, depending on the individual metering instruments location: outside or inside the apartment.

In the first case, it is reasonable to install measuring instruments with a pulse output. This facilitates easy deployment of any wired network [1].

When placing metering units within residential premises, it is advisable to choose wireless technology. This solution provides for the installation of meters with a built-in radiomodule, prevents outsiders from interfering in the transmitting readings process and provides easy access to information from instruments installed in hard-to-reach places. Radiomodules with the Wireless M-Bus protocol are the most widespread [2]. In this case, the receiving device (repeater) is installed in common areas on the floor. The number of repeaters is determined by the distance to metering instruments, the floors and walls materials of the building, as well as the experience of the organization that performs the design work and the network deployment.

The next link in the information transmission is the final receiving device with mains power supply and a permanent connection to the Internet.

In the case of creating a system for transmitting readings from domestic meters or automation of an industrial facility, it is necessary to additionally study the terrain, the material type and housing density, the presence of green spaces in the signal path, etc. All these factors affect the system structure, especially the determination of the required repeaters number.

These problems solution is possible with the help of a denser repeaters placement and their number increase. But such a quantitative change causes an increase in the signal transit time from the most distant metering instrument to the receiving device and increases the risk of loss or distortion of the transmitted data.

The modern network technologies use makes it possible to automate an object of any complexity. At the same time, along with traditional wired technologies, various modern radio technologies are being introduced (LoRaWAN, NB-IoT).

Such technologies allow significantly speed up and simplify the process of meters readout automation, including those of different models and manufacturers [2]. Today, the creation of data transmission systems from metering instruments becomes available, even in the residential sector. We are talking about apartment buildings, housing estates, massifs, etc. Such objects are characterized by a large number of metering units and their dense location in comparison with industrial facilities.

The technology choice for the information network deployment is limited by the current state of a certain object (a new building at the design or settlement stage, a populated house) and the special aspects of the metering unit's location for a separate apartment.

*Keywords:* meter, readings, data system, automated system, technologies.

#### **References**

- [1] А. В. Писарець, Є. В. Писарець, “Автоматизовані системи передачі показань від приладів обліку енергоносіїв. Частина 1”, *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 59(1), с. 95 – 101, 2020. DOI: 10.20535/1970.59(1).2020.210037.
- [2] А. В. Писарець, Є. В. Писарець, “Автоматизовані системи передачі показань від приладів обліку енергоносіїв. Частина 2”, *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 60(2), с. 79 – 86, 2020. DOI: 10.20535/1970.60(2).2020.221452.

УДК 681.121.84

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ МАСОВОЇ ВИТРАТИ СУХОЇ НАСИЧЕНОЇ ПАРИ ЗА ДОПОМОГОЮ СОПЛА ISA 1932

*Майданович І. Р., Лесовой Л. В.*

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна  
E-mail: [iryana.maidanovych.avm.2018@lpnu.ua](mailto:iryana.maidanovych.avm.2018@lpnu.ua), [techinfoflow@yahoo.co.uk](mailto:techinfoflow@yahoo.co.uk)*

При вимірюванні масової витрати плинного енергоносія, до якого відноситься і суха насичена пара, широке застосування набув метод змінного перепаду тиску. Первинним перетворювачем при застосуванні цього методу

найчастіше застосовують діафрагму з кутовим способом відбору перепаду тиску. Єдиним недоліком цього звужувального пристрою є велика втрата тиску на діафрагмі при максимальному значенні витрати. Для відносного діаметра  $\beta = 0,303154$  звужувального пристрою, як для діафрагми з кутовим способом відбору тиску [1], так і для сопла ISA 1932 [2], втрати тиску  $\Delta\omega$  при максимальному значенні масової витрати [1 – 3] сухої насиченої пари, становлять відповідно 89,7 % і 83 %, а для відносного діаметра  $\beta = 0,303154$  – відповідно 45,5 % і 30,9 % від верхньої границі вимірювання перепаду тиску на дифманометрі. Тому для вимірювання масової витрати  $q_m$  сухої насиченої пари застосовують стандартний звужувальний пристрій, такий як сопло ISA 1932.

Масову витрату сухої насиченої пари розраховують відповідно до [2] за рівнянням

$$q_m = \frac{\pi d^2}{4} C E K_{\text{ш}} \varepsilon \sqrt{2 \Delta p \rho}, \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр горловини сопла ISA 1932 при температурі середовища  $t$ ;  $C$  – коефіцієнт витікання сопла ISA 1932;  $E$  – коефіцієнт швидкості входу;  $K_{\text{ш}}$  – поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу;  $\varepsilon$  – коефіцієнт розширювання енергоносія;  $\Delta p$  – перепад тиску на соплі ISA 1932;  $\rho$  – густина сухої насиченої пари за температури  $t$  [4].

Коефіцієнт витікання  $C$  сопла ISA 1932 відповідно до [2] і [3] розраховують за рівнянням

$$C = 0,99 - 0,2262 \beta^{4,1} - (0,00175 \beta^2 - 0,0033 \beta^{4,15}) \left( \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{1,15}, \quad (2)$$

де  $\text{Re}$  – число Рейнольда, значення якого визначають за рівнянням [3]

$$\text{Re} = \frac{4 q_m}{\pi D \mu}, \quad (3)$$

$\mu$  – динамічна в'язкість сухої насиченої пари за робочої температури сухої насиченої пари [4].

Коефіцієнт швидкості входу  $E$  відповідно до [3] визначають за рівнянням

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}. \quad (4)$$

Значення коефіцієнта розширення  $\varepsilon$  плинного енергоносія відповідно до [2], [3] розраховують за рівнянням

$$\varepsilon = \sqrt{\left( \frac{\kappa \tau^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa - 1} \right) \left( \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{\frac{2}{\kappa}}} \right) \left( \frac{1 - \tau^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \tau} \right)}, \quad (5)$$

де  $\kappa$  – показник адіабати сухої насиченої пари; значення  $\tau$  обчислюють за

виразом

$$\tau = 1 - \frac{\Delta p}{p}. \quad (6)$$

Рівняння (5) можна застосовувати за значень  $\Delta p/p \leq 0,25$ .

Для знаходження масової витрати сухої насиченої пари для зменшення втрат тиску на соплі ISA 1932 також необхідно зменшити втрати тиску на внутрішній поверхні вимірювального трубопроводу. Для цього внутрішню поверхню вимірювального трубопроводу виготовляють таким чином, щоб значення відносної шорсткості було меншим за мінімально допустиме значення, яке наведене в [2]. Тоді значення поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу буде дорівнювати одиниці.

Підставлянням значень коефіцієнта витікання  $C$  сопла ISA 1932, яке визначене за рівнянням (2), і числа Рейнольда, яке розраховане за рівнянням (3) до рівняння (1), отримуємо рівняння для визначення масової витрати сухої насиченої пари, яке буде залежати від цієї масової витрати у вигляді

$$q_m = A \left[ 1 - \frac{10^{6,9} \beta^2 (0,00175 - 0,0033\beta^{2,15})}{(0,99 - 0,2262\beta^{4,1}) \left( \frac{4}{\pi D \mu} \right)^{1,15} q_m^{1,15}} \right], \quad (7)$$

Значення коефіцієнта  $A$  після спрощення обчислюють за рівнянням

$$A = 1,0996135 (1 - 0,2284848 \beta^{4,1}) d^2 E \varepsilon \sqrt{\Delta p \rho}. \quad (8)$$

Як бачимо, рівняння (7) для визначення масової витрати сухої насиченої пари, є рівнянням невизначеного типу, тобто  $q_m = f(q_m)$  і може бути вирішене або ітераційним шляхом або за допомогою іншої математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, яка визначає масову витрату сухої насиченої пари.

Відповідно до ітераційного методу, наведеного у [3], визначають значення відносного відхилення  $\delta_{q_m}$ , яке розраховують за рівнянням

$$\delta_{q_m} = 100 \frac{|q_{m_{i-1}} - q_{m_i}|}{q_{m_i}}, \quad (9)$$

де  $q_{m_{i-1}}$  – попереднє значення масової витрати сухої насиченої пари;  $q_{m_i}$  – поточне значення масової витрати сухої насиченої пари.

Розрахунок масової витрати сухої насиченої пари завершують, коли відносне відхилення  $\delta_{q_m}$  буде меншим за 0,001 %. Тому застосування ітераційного методу для визначення масової витрати сухої насиченої пари

збільшує час та об'єм пам'яті, який надається мікроконтролеру або мікропроцесору для вирішення цієї задачі.

Врахувавши рівняння (2), (3) і підставивши їх у рівняння (7), після спрощення отримаємо рівняння для визначення масової витрати сухої насиченої пари при застосуванні звужувального пристрою сопло ISA 1932

$$q_m = A \left\{ 1 - B \left[ 1 - B \left( 1 - B_1 \right)^{-1,15} \right]^{-1,15} \right\}, \quad (10)$$

де

$$B = \frac{B_0}{A^{1,15}}; \quad (11)$$

$$B_0 = 10635,46 \frac{\beta^2 (1 - 1,885714 \beta^{2,15})}{1 - 0,2284848 \beta^{4,1}} (D\mu)^{1,15}; \quad (12)$$

$$B_1 = \frac{B_0}{1600862 (D\mu)^{1,15}}. \quad (13)$$

Рівняння (10), (8), (11) – (13) було перевірено для контрольних точок, отриманих за допомогою стандартизованої програми “САПР “Расход-РУ” [4] і відносно відхилення становило менше за 0,001 %. Це дозволяє застосовувати рівняння при вимірюванні масової витрати сухої насиченої пари за допомогою мікропроцесорів та мікроконтролерів, які використовують у обчислювачах витрати та кількості середовища та у вимірювальних комплексах.

*Ключові слова:* вимірювання витрати, суха насичена пара, сопло ISA1932, система обліку.

#### **Література**

- [1] ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 (ИСО 5167-2:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2–2005(ИСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, MOD)
- [2] ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009 (ИСО 5167-3:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 3. Сопла та сопла Вентурі. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.3–2005(ИСО 5167-3:2003), IDT; ISO 5167-3:2003, MOD).
- [3] Є. Пістун, Л. Лесовой, *Нормування витратомірів змінного перепаду тиску*. Львів, Україна: Видавництво Інституту енергоаудиту та обліку енергоносіїв, 2006.
- [4] Є. Пістун, Л. Лесовой, Ф. Матіко, Д. Марковський, та Р. Лесовой, *САПР “Расход-РУ”. Комп'ютерна програма. Посібник користувача*. Львів: Видавництво Інституту енергоаудиту та обліку енергоносіїв, 2007.

УДК 662.767:536.7

## ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ СУМІШІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З ВОДНЕМ ДЛЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ЗАМІЩЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

*Матіко Ф. Д., Матіко Г. Ф., Масняк О. Я., Крих Г. Б.*  
Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна  
E-mail: [fmatiko@gmail.com](mailto:fmatiko@gmail.com)

Сучасні енергетичні інновації багатьох країн світу все частіше пов'язують з перспективними напрямками застосування водню в енергетиці. Зокрема, низка країн ЄС вже розпочала транспортування в газотранспортній системі газової суміші з вмістом водню 5-10 %, що дає можливість суттєво зменшити викиди вуглекислого газу. Україна також має хороші перспективи та потенціал розвитку водневої енергетики. Під час транспортування суміші природного газу (ПГ) з воднем у газорозподільних мережах актуальним є завдання розрахунку об'єму суміші ПГ з воднем, необхідного для забезпечення кількості енергії еквівалентної до енергії "чистого" ПГ.

Авторами запропоновано спосіб обчислення об'єму суміші ПГ з воднем для двох видів одиниць вимірювання об'єму ПГ: м<sup>3</sup> за ст. ум. за ГОСТ 2939-63 [1] (тиск 101325 Па, температура 20 °С); м<sup>3</sup> для об'єму ПГ за робочих умов транспортування суміші (робочий тиск та температура). Для визначення коефіцієнта співвідношення між об'ємом суміші ПГ з воднем та об'ємом ПГ без водню за стандартних умов  $K_E^{c.y.}$ , а також за робочих умов  $K_E$  запропоновано застосувати залежності:

$$K_E^{c.y.} = \frac{V_{ПГН_2}^{c.y.}}{V_{ПГ}^{c.y.}} = \frac{H_{ПГ}}{H_{ПГН_2}}; \quad K_E = \frac{V_{ПГН_2}}{V_{ПГ}} = \frac{H_{ПГ}}{H_{ПГН_2}} \cdot \frac{K_{ПГН_2}}{K_{ПГ}}, \quad (1)$$

де  $V_{ПГ}^{c.y.}$ ,  $V_{ПГ}$  – об'єм ПГ без водню за стандартних і робочих умов;  $V_{ПГН_2}^{c.y.}$ ,  $V_{ПГН_2}$  – об'єм ПГ з воднем за стандартних і робочих умов;  $H_{ПГ}$  – вища теплота згоряння ПГ без водню;  $H_{ПГН_2}$  – вища теплота згоряння суміші ПГ з воднем [2];  $K_{ПГ}$ ,  $K_{ПГН_2}$  – коефіцієнт стисливості ПГ та суміші ПГ з воднем за робочих умов. Як видно з (1), значення коефіцієнта співвідношення об'ємів за стандартних умов залежить тільки від складу ПГ та вмісту водню в суміші, а співвідношення об'ємів за робочих умов – також і від тиску та температури робочих умов.

Застосування отриманих авторами залежностей (1) дає змогу обчислити коефіцієнти співвідношення об'єму "чистого" ПГ та суміші ПГ з воднем, а отже і об'єм суміші ПГ з воднем, який необхідно подати газопроводом до місця відбору для отримання відповідної кількості енергії.

*Ключові слова:* природний газ, водень, об'єм суміші, кількість енергії.

### Література

- [1] ГОСТ 2939-63 Газы. Условия для определения объема. Москва, СССР: Изд-во стандартов, 1988.

[2] ДСТУ ISO 6976:2009 Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу (ISO 6976:1995/Cor. 2:1997, Cor. 3:1999, IDT)

УДК 681.121

## ЗАСТОСУВАННЯ ВІРТУАЛЬНОГО ТА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ГАЗОФАЗНИХ СЕРЕДОВИЩ

*Драчук О. О.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [o.drachuk@kpi.ua](mailto:o.drachuk@kpi.ua)*

Підвищення ефективності будь-яких інженерних процесів є постійним завданням для науковців та творців сучасної техніки, в тому числі й пошук нових методів покращення її якості. При проведенні наукових пошукових робіт у галузі витратовимірювачів велику роль відіграє саме процес визначення конкретних умов дослідження. Сучасні програмні комплекси дозволяють здійснювати віртуальне моделювання процесів плинину рідиннофазних середовищ, їх впливу на внутрішні елементи та механізми приладів, а також досліджувати на основі математичних моделей взаємодію вимірюваного середовища і перетворювачів витрати та їх складових.

Якщо для вирішення задачі при дослідженні одних і тих самих характеристик використати паралельно різні програмні комплекси, то можна виключити, або зменшити похибки при завданні умов моделювання та розрахунків.

Моделювання плинину газу вимірювальною ділянкою дає знання не лише про гідродинамічні характеристики потоку газу, результати досліджень дають можливість обрати класи та діапазони вимірювання приладів, що є складовою вимірювального комплексу, визначити місця встановлення перетворювачів та реєстраторів різних фізичних величин [1-4].

При проведенні досліджень комплексу вимірювання витрати природного газу для імітаційних досліджень було обрано програмні комплекси: Ansys CFX (рис. 1, а), SolidWorks (рис. 1, б), Autodesk Inventor, для математичного моделювання складових комплексу застосовано MatLab та MathCad.

Результати аналізуються як за візуальною інформацією – лінії течії, контури, вектори швидкостей, тощо, так і за числовими значеннями характеристик по лініях, площинах та об'ємах для подальшого опрацювання.

Моделювання проводиться для різних конфігурацій вимірювального комплексу при використанні трьох різних ультразвукових витратомірів двоканального, триканального та накладного класів з метою визначення найкращої конфігурації комплексу вимірювання витрати для подальших натурних-досліджень.



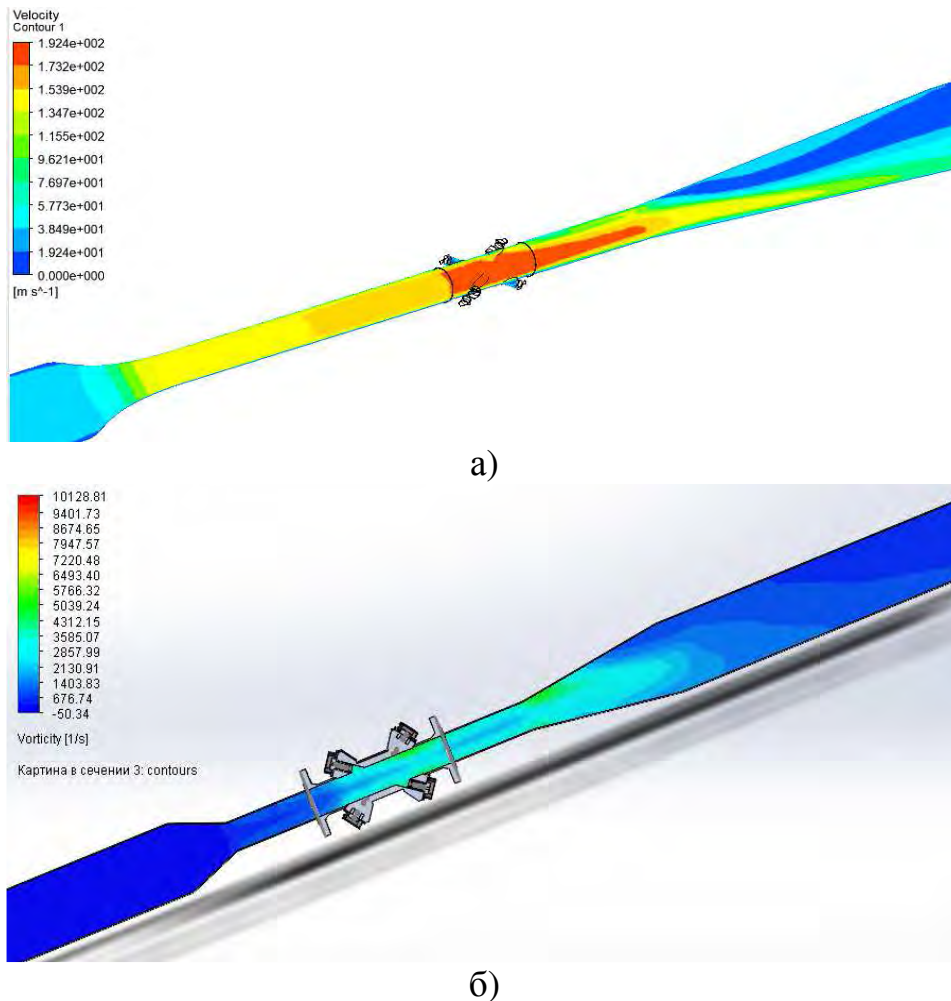


Рис. 1. Візуалізовані результати імітаційного дослідження ультразвукового витратоміра на звуженій ділянці: а) в Ansys CFX; б) в SolidWorks Flow Simulation

Описані методи проведення досліджень з використанням різних програмних комплексів віртуального (імітаційного) та математичного моделювання доцільно використовувати при створенні сучасних інноваційних приладів та систем.

**Ключові слова:** витрата газу, дослідження витратомірів, імітаційне моделювання, CFD.

#### Література

- [1] І. В. Коробко та О. О. Драчук, «Приладовий комплекс реєстрації об'єму та об'ємної витрати газу», *Mechanics and Advanced Technologies*, №3 (84), с. 61-68, 2018. DOI:10.20535/2521-1943.2018.84.143848.
- [2] І. В. Коробко та І. А. Гришанова, «Розробка CFD моделі турбінного витратоміра газу», *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, №60 (2), с. 27-32, 2020. DOI:10.20535/1970.60(2).2020.221413.
- [3] І. В. Коробко та Д. Ю. Капітанчук, «Врахування умов та відмінностей при калібруванні і застосуванні вимірювальних перетворювачів природного газу», *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, №58(2), с. 57-61, 2019. DOI:10.20535/1970.58(2).2019.189519.

- [4] I. Korobko and A. Pysarets, «Flow transducers metrological performances optimization with flow bodies at flow asymmetry conditions», *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, Вип. 57(1), с. 56-61, 2019. DOI:10.20535/1970.57(1).2019.172024.

УДК 681.121.89.082.4

## ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ГАЗУ ЗА УМОВ СКЛАДНИХ СПОТВОРЕНЬ СТРУКТУРИ ПОТОКУ

*Роман В. І., Матіко Ф. Д.*

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна*

*E-mail: [roman\\_vitaliy@ukr.net](mailto:roman_vitaliy@ukr.net), [fmatiko@gmail.com](mailto:fmatiko@gmail.com)*

Як відомо основним недоліком ультразвукових витратомірів (УЗВ) є їх чутливість до спотворень структури потоку, яка виникає після проходження газу через місцеві опори (МО) вимірювального трубопроводу (ВТ). Згідно [1] існує два способи зменшення цієї чутливості: 1) встановлення перед/після УЗВ прямолінійної ділянки ВТ достатньої довжини; 2) застосування спеціальних струминовипрямлячів або пристроїв підготовки потоку (ППП), які «згладжують» структуру потоку. Як видно, в обох випадках рекомендації стосуються не самого УЗВ, а вимог до його інсталяції. В даній роботі запропоновано математичне моделювання, яке дозволяє знайти рішення, які б удосконалювали не вузол обліку газу, а тільки УЗВ.

Нами проведено математичне моделювання із застосуванням емпіричних функцій швидкості Salami [2]. В [2] показано, що застосування УЗВ із 4 акустичними каналами (АК) дозволяє усунути вплив спотворень структури потоку після типових МО (створюють асиметрію або закручення потоку). Проте у випадках, коли МО є складнішим і нетиповим – кругові теплообмінники (circular heat exchangers) та спарені канали (chimney stacks), структура потоку стає занадто складною (багатоядерною [3]), і застосування УЗВ з 4 АК вже недостатньо. Для прикладу, на рис. 1 показано таку складну тривимірну структуру потоку [3], а на рис. 2 показано похибку хордового УЗВ залежно від кількості АК. При цьому, за критерій прийнято вимогу ISO 17089-1 [1, пп.5.9.3.2] про те, що максимальна додаткова похибка УЗВ зумовлена спотворенням структури потоку не повинна перевищувати 0,3 %.

З рис. 2 можна побачити, що збільшення кількості АК до шести, дозволило зменшити похибку УЗВ до регламентованих ISO 17089-1 меж.

Іншим способом, який можна застосувати у випадку складних спотворень структури потоку, є кут встановлення УЗВ відносно горизонтальної осі (кут  $\alpha$  на рис. 3). За вимогами [1] цей кут по замовчуванню рівний  $0^\circ$ . Нами також проведено такі дослідження, деякі результати яких наведено на рис. 4.

З рис. 4 можна побачити, що зміна кута встановлення  $\alpha$  дозволяє значною мірою змінити як знак похибки УЗВ, так і її величину.

Як висновок, у випадках, коли реконструкція існуючого вузла обліку газу неможлива, єдиним виходом є заміна УЗВ.

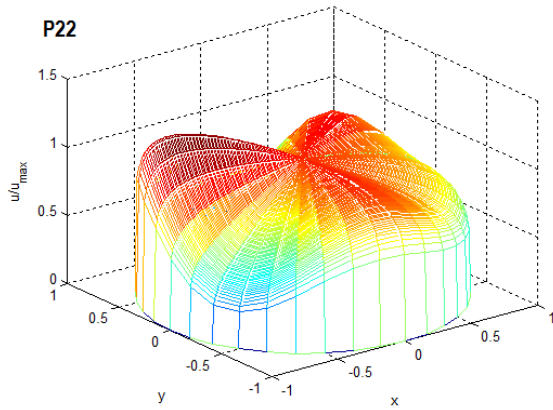


Рис. 1. Тривимірний профіль емпіричної багатоядерної функції Salami P22

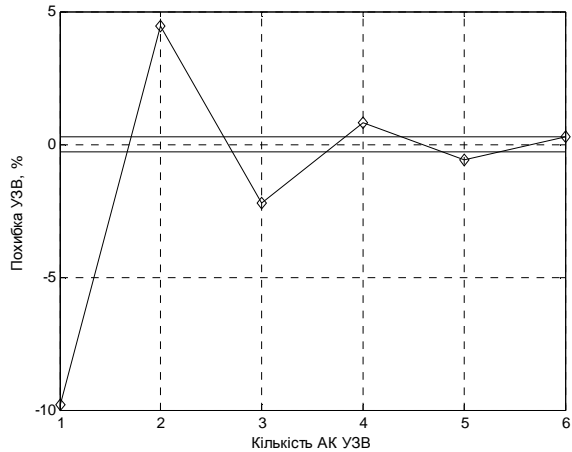


Рис. 2. Похибка УЗВ залежно від кількості АК для потоку за функцією Salami P22

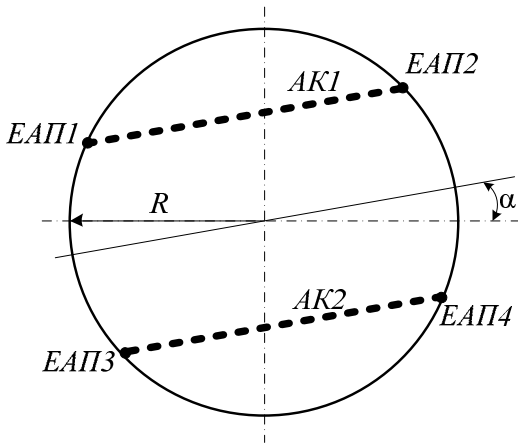


Рис.3. Схема двоканального УЗВ:  
ЕАП – електроакустичний перетворювач

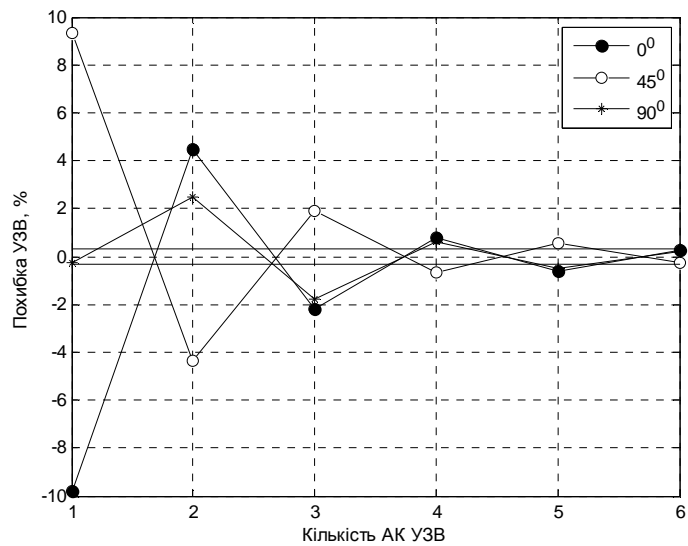


Рис.4. Похибка УЗВ залежно від кількості АК та кута  $\alpha$  для потоку за функцією Salami P22

При цьому новий УЗВ повинен мати покращену конструкцію, а саме: збільшену кількість АК, тип їх розташування (хордовий або комбінований), змінено (за потреби) метод розрахунку вагових коефіцієнтів АК. Зрозуміло, що даний спосіб моделювання є індивідуальним, і вимагає експериментальної апробації для ширшого застосування. Також, у випадку дуже складних спотворень потоку, які неможливо аналітично описати, рекомендація заміни УЗВ не є достатньою, і вимагає повернення до вимог ISO 17089-1 – встановлення перед УЗВ прямолінійної ділянки ВТ достатньої довжини, або застосовувати ППП. Натомість застосування подібного моделювання дозволяють розробити зміни до конструкції існуючих УЗВ, або розробити зовсім нові УЗВ на стадії проектування під складні умови обліку.

*Ключові слова:* ультразвуковий витратомір газу, спотворення структури потоку, функції Salami.

**Література**

- [1] International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
- [2] F. D. Matiko, V. I. Roman, «Investigation of ultrasonic flowmeter error in conditions of distortion of flow structure using one peak functions Salami», *Metrology and devices*. № 3, pp. 36–43, 2017. (Ukrainian)
- [3] L. A. Salami, “Application of a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes”, *Trans. Inst. Meas. Control*, 6, pp. 197–206, 1984.

УДК 621.314.58

## ОЦІНКА БАГАТОРІВНЕВИХ FCML ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ТРАНЗИСТОРОМ НА ОСНОВІ НІТРИДУ ГАЛІЮ

*Арсенюк Д. О., Зіньковський Ю. Ф.  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна  
E-mail: [arsedmitry@gmail.com](mailto:arsedmitry@gmail.com), [yuzin@ukr.net](mailto:yuzin@ukr.net)*

На сьогоднішній день, створення більш ефективних комутаційних пристроїв для перетворення різноманітних форм та рівнів потужності являються перспективною галуззю для дослідження в області силової електроніки. Використання таких пристроїв у різноманітних спектрах задач, таких як, телекомунікаційні мережі, транспортні системи, поновлюванні джерела енергії, тощо, сприяють розвитку даної області та дозволяють досягти більшої енергоефективності.

Багаторівневі перетворювачі з плавучими конденсаторами (FCML) – мостова топологія, яка ділить за допомогою конденсаторів вхідну напругу на декілька рівнів між каскадами, дозволяючи використовувати низьковольтні транзистори з меншими значеннями порогової напруги та кращими динамічними характеристиками за більш високих вхідних напруг та потужностей. Основною проблемою є те, що при збільшенні рівнів необхідним є використання більшого числа конденсаторів та системи балансування напруг в системі. Транзистори мають працювати водночас, що підвищує вимоги до проектування, такі як зменшення вхідних пульсацій та чистота сигналу керування транзисторів, тому що будь який дисбаланс призведе до порушення роботи пристрою загалом. Менші втрати за перемикання нітрид-галієвих транзисторів роблять доцільним використання їх у таких топологіях.

На даний час межею таких перетворювачів є 7-рівневі пристрої, у яких частота переключення нітрид-галієвих транзисторів складає 120 кГц, що є на даний момент найбільш досягнутою частотою для таких реалізацій. Збільшення щільності енергії та зменшення вхідних пульсацій дозволить збільшити частоту перемикання при збереженні чи навіть підвищенні коефіцієнта корисної дії (ККД).

**Ключові слова:** силова електроніка, FCML, галій нітрид, GaN, енергоефективність.

**Література**

- [1] M. F. Escalante, J. C. Vannier, and A. Arzande, “Flying capacitor multilevel inverters and DTC motor drive applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, issue. 4, pp. 809-815, 2002. DOI: 10.1109/TIE.2002.801231.
- [2] Jan S. Rentmeister; Jason T. Stauth, “A 48V:2V flying capacitor multilevel converter using current-limit control for flying capacitor balance”, in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa (FL, USA), 2017, pp. 367–372 DOI: 10.1109/APEC.2017.7930719.
- [3] A. Lidow, J. Strydom, M. de Rooij, D. Reusch, *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*, 2 ed. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2014, pp. 1–18. DOI: 10.1002/9781118844779.

УДК 621.314.58

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПИТАНИЯ РЭА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРБИД-КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

*Бурковский Я. Ю., Зиньковський Ю. Ф.*

*Національний технічний університет України*

*“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна*

*E-mail: [yaroslav0590@gmail.com](mailto:yaroslav0590@gmail.com), [yuzin@ukr.net](mailto:yuzin@ukr.net)*

Повышение эффективности систем питания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является одной из важнейших задач современной электроники. Компактные системы питания и преобразователи с высоким КПД находят применение в различных задачах, таких как носимая электроника, электротранспорт, системы телекоммуникации, современное вооружение и т.д. Одним из возможных способов повышения эффективности преобразователей является использование силовых элементов на основе полупроводников с широкой запрещённой зоной, в частности, карбида кремния. Преимуществом такого решения является то, что силовые элементы на основе карбида кремния (SiC) обеспечивают меньшие статические и динамические потери, большие рабочие напряжения, лучшую теплопроводность, расширенный диапазон рабочих температур по сравнению с традиционными решениями на основе кремния при сравнимой стоимости [1]. Авторами проведено компьютерное моделирование однофазного и двухфазного корректора коэффициента мощности (PFC) с использованием карбид-кремниевых транзисторов и диодов (C3M0060065D и C6D10065A с шириной запрещённой зоны 3.26 эВ. В ходе исследования было получено, что при использовании SiC-транзисторов, суммарные потери в транзисторе уменьшились более чем в 2 раза, а время переключения в 4 раза по сравнению с кремниевыми транзисторами [2]. Кроме того, предложенная конструкция двухфазного преобразователя обеспечивает дополнительный прирост КПД, т.к. потери в элементах растут нелинейно по отношению к току через них. Это позволяет, при необходимости, повысить

рабочую частоту преобразователя, уменьшит размер радиаторов, номиналы и силовых дросселей, и, как следствие, значительно снизит стоимость и габариты преобразователя.

*Ключевые слова:* силовая электроника, системы питания, энергоэффективность, карбид кремния, запрещённая зона.

**Литература**

- [1] S. A. Rizzo, G. Scelba, G. Susinni, D. Paternostro and R. Scollo, "Comparison between innovative TO-247 IGBT copacked with SiC diode and SiC MOSFET in bidirectional boost converter," in *2020 2nd IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES)*, Cagliari, Italy, 2020, pp. 359-364.  
DOI: 10.1109/IESES45645.2020.9210699.
- [2] Я. Ю. Бурковский, Ю. Ф. Зиньковский, "Моделирование сетевого корректора коэффициента мощности (PFC) с использованием карбид кремниевых (SiC) силовых транзисторов", на *IX Міжнар. наук.-техн. конф. Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (РТПСАС-2020)*, Київ, 2020, с.151-153.