

СЕКЦІЯ 11

МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 532.6.08

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ

Білищук В. Б.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

Івано-Франківськ, Україна

E-mail: viktor.bilishchuk@nung.edu.ua

Для дослідження міжфазного натягу рідин використовують прилади, в яких застосовують електродвигун для приведення досліджуваних рідин в обертний рух. До системи керування швидкістю обертання вала двигуна в цих приладах висувають високі вимоги, щодо точності і стабільності підтримування сталої швидкості обертання двигуна в широкому діапазоні значень (від 1000 до 10000 об/хв) при проведенні досліджень міжфазного натягу рідин [0].

На кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій було розроблено прилад, в якому було використано аналоговий стабілізатор частоти обертання електродвигуна. Недоліком застосованого стабілізатора є незадовільна стабілізація частоти обертання двигуна в широкому діапазоні зміни обертів, яка необхідна для роботи приладу. Використана схема задовільно працює у вузькому діапазоні обертів двигуна – 3000 – 5000 об/хв. Застосування дискретного ПД регулятора (на базі мікроконтролера) для регулювання і стабілізації швидкості обертання вала двигуна має покращити характеристики розробленого приладу. Пропонується використати віртуальне моделювання схеми керування електродвигуном, що повинно полегшити і прискорити процес розробки такого ПД регулятора [0].

Для проектування ПД-регулятора електродвигуна необхідним є дослідження характеристик і створення моделі застосованого електродвигуна в приладі, що є завданням дослідження цієї роботи.

В приладі для дослідження міжфазних характеристик рідин пропонується використати електродвигун типу 775. Він при живленні напругою 12 В забезпечує швидкість обертання вала 12500 об/хв без навантаження, що цілком задовольняє його вибір для застосування в приладі. Виробником зазначені інші характеристики: струм зупину вала 20,6 А, крутний момент зупину 0,466 Н·м, параметри під навантаженням крутним моментом 61 мН·м – струм 4,2 А при швидкості обертання вала 5240 об/хв [0].

Для створення моделі двигуна використаємо його передавальну характеристику в загальному вигляді:

$$\Omega(s) = K_T \frac{1}{L_a s + R_a} \frac{1}{J_m s + B_m}, \quad (1)$$

де K_T – конструктивний коефіцієнт двигуна, L_a , R_a – індуктивність і опір якірного ланцюга, J_m – момент інерції на валу двигуна, B_m – тертя в підшипниках двигуна.

Надані характеристики виробником двигуна дозволяють розрахувати K_T , L_a і R_a , але не дозволяються отримати інерційні характеристики двигуна. Цей параметр визначається як інерцією рухомих деталей самого двигуна так і деталей, які двигун приводить в рух. Інерцію рухомих деталей можна розрахувати аналітично або моделюванням методом кінцевих елементів у відповідному програмному забезпеченні. Так як тривимірна модель приладу була побудована при його розробці, тому було обрано метод моделювання. Момент інерції J_m було отримано з побудованої тривимірної моделі ротора двигуна з насадженим на вісь патроном у програмі Solidworks. Ця програма дозволяє розраховувати моменти інерції тривимірних моделей відносно осей. Для отримання B_m було побудовано структурну схему двигуна згідно передавальної характеристики (рис. 1) в програмі Proteus. Задавши значення $\tau=0$ в блоці LP2 можна визначити B_m як відношення сигналів на виході і вході цього блоку S2(OUT)/LP2(OUT) а τ розрахувати з виразу $\tau=J_m/B_m$. Таким чином отримано всі параметри моделі електродвигуна, які можна використовувати для проектування ПД регулятора приладу. В подальшому передбачається використати розроблену модель двигуна для розроблення дискретного ПД регулятора в програмі Proteus.

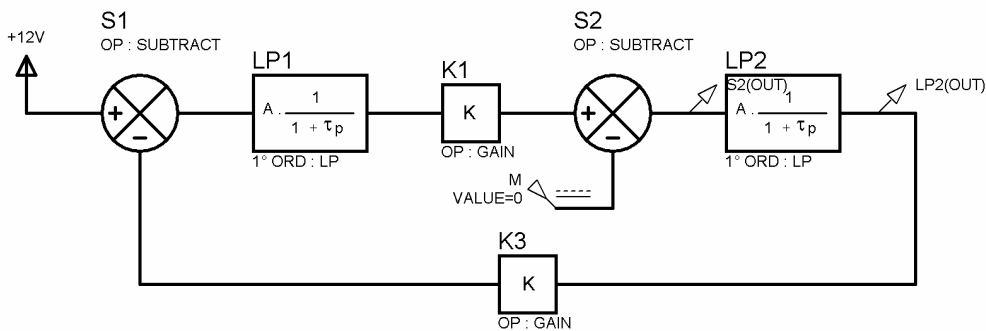


Рис 1. Структурна схема моделі електродвигуна

Створена модель електродвигуна буде використана у віртуальній моделі ПД регулятора для визначення його регулювальної функції моделюванням в програмі Proteus. В роботі було продемонстровано використання віртуального моделювання на комп'ютері для розробки блоків приладу.

Ключові слова: Стабілізатор частоти обертання, електродвигун, ПД регулятор, віртуальне моделювання.

Література

- [1] Spinning drop tensiometer – SVT 25. [Онлайн]. Доступно: <https://www.dataphysics-instruments.com/products/svt/#!> (дата звернення: 30.10.2023).

- [2] В. Б. Біліщук, “Віртуальне моделювання приладів”, на *Всеукраїнській наук.-практ. конф. молодих учених і студентів Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості*, Івано-Франківськ, 2022, с. 109-110.
- [3] Motor-775-12V-12500rpm [Онлайн]. Доступно: <http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/Motor-775.pdf> (дата звернення: 30.10.2023).

УДК 511.1+681.2

РОЗРОБЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗМОЧУВАННЯ ЗА ВИМІРЯНИМ ТИСКОМ У КРАПЛІ

Боднар Р. Т.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна
E-mail: mivt@nung.edu.ua*

У наукових і практичних дослідженнях часто вивчають взаємодію між різними рідинами і твердими тілами. Ці міжфазні взаємодії характеризуються поняттями адгезії та змочування, які взаємопов'язані.

Явища адгезії і змочування широко розповсюджені як в природі, так і в різних галузях промисловості. Склеювання матеріалів, нанесення лакофарбових і неорганічних покриттів, одержання різних матеріалів на основі зв'язуючих речовин та наповнювачів (пластмаси, гума, бетон і т.д.), зварювання та паяння металів, друкування, збагачення руд, добування нафти тощо - всі ці процеси зв'язані з адгезією і змочуванням, які в значній мірі визначають якість матеріалів і виробів.

Незважаючи на виключно важливість, процеси змочування і адгезії до цих пір недостатньо зрозумілі, вивчення їх продовжується в усіх розвинених країнах. Дослідників тепер особливо цікавить кінетика змочування, нерівноважне змочування та інші сторони процесів змочування.

Теоретична оцінка адгезії в даний час дуже приблизна, що пояснюється не тільки недосконалістю рівнянь, за якими розраховуються сили міжмолекулярних зв'язків, але й тим, що неможливо оцінити реальну кількість зв'язків, які припадають на одиницю площі. Крім того, важко оцінити справжню площу контакту, яка завжди значно більша візуально спостережуваної завдяки наявності шорсткості в поверхневому шарі.

Величину адгезійної взаємодії між рідинами і твердими тілами можна визначити в процесі видалення рідини з поверхні твердого тіла, що відбувається в середовищі газоподібної фази. Адгезію рідини оцінюють роботою, яку потрібно затратити для відривання рідини з твердої фази [1]

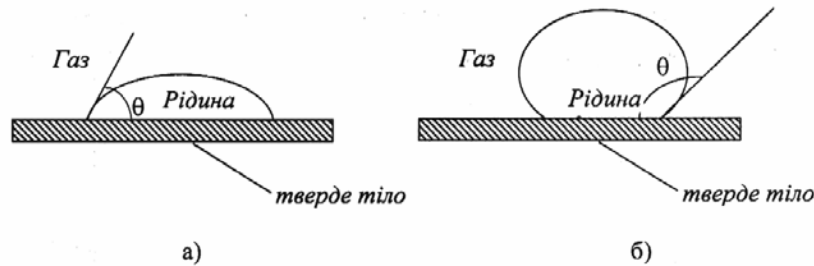
$$W_a = \frac{W}{S}, \quad (1)$$

де W_a – робота, яка визначає взаємодію рідини з твердою поверхнею і яка необхідна для роз'єднання контактуючих тіл; S – площа контакту рідини з

поверхнею твердого тіла.

Таким чином робота адгезії є важливою характеристикою взаємодії на межі розділу “рідина-тверде тіло”.

Роботу адгезії можна оцінити посередніми методами, які особливо зручні, якщо хоча б однією із взаємодіючих фаз є рідина і можна виміряти, наприклад, крайовий кут змочування при наявності одночасного контакту трьох незмішуваних фаз, одна з яких, зазвичай, є газом (повітрям). На рис. 1 показано крайовий кут змочування θ краплі рідини з поверхнею твердого тіла.



а – рідина змочує тверде тіло; б – рідина не змочує тверде тіло

Рис. 1. Крапля рідини на змочуваній (а) та незмочуваній (б) поверхнях

Зв'язок роботи адгезії і крайового кута змочування описується рівнянням Юнга, яке у видозміненій формі записується [1]

$$W_a = \sigma_{pg}(1 + \cos \theta), \quad (2)$$

де σ_{pg} – поверхневий натяг між рідиною і газом.

Як видно з (2) для оцінки адгезії потрібно виміряти крайовий кут змочування θ та поверхневий натяг рідини σ_{pg} , який визначається порівняно легко відомими засобами.

Крайовий кут змочування можна визначати кількома методами, наприклад, простим оптичним методом, але він малопродуктивний і важко автоматизувати процес вимірювання. Інші методи складніші як в апаратурному, так і в методичному плані.

У багатьох випадках визначення крайового кута змочування проводиться для обмеженої кількості зразків твердих тіл, але з різними рідинами. У такому випадку пропонується визначати крайовий кут змочування за вимірюванням тиску у краплі рідини, яка витискується на поверхню твердого тіла. Підставою для цього служить рівняння Лапласа [2]

$$P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

де R_1 і R_2 – радіуси кривизни точки капілярної поверхні у взаємно перпендикулярних площинах, P – тиск у краплі рідини.

Рівняння (3) виражає зв'язок між поверхневим натягом рідини, геометричними параметрами краплі і тиском всередині краплі. Виражаючи радіуси кривизни у диференціальній формі та об'єднуючи рівняння (2) і (3) і розв'язуючи чисельно цю систему отримуються значення тиску в краплі для

кожного крайового кута θ від 1° до 180° для фіксованих значень капілярної сталої $a^2 = \frac{\sigma}{\rho g}$ та об'єму краплі.

Одержані результати були апроксимовані за допомогою ортогональних поліномів Чебишева типу

$$\cos\theta = 1 - \sum_i^n C_i P^i. \quad (4)$$

Коефіцієнти C_i отримані до дев'ятого степеня включно для визначених значень параметра a . Одержані результати тиску в краплі від крайового кута змочування приведені на рис. 2. Криві 1 – 4 отримані для значень параметра a відповідно 0.5, 1.0, 1.5, 2.0.

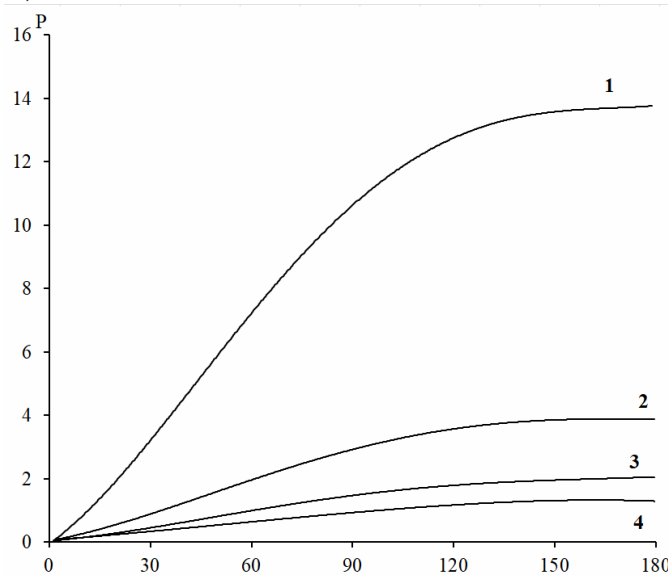


Рис. 2. Залежність тиску в краплі від крайового кута змочування

Для реалізації запропонованого методу визначення $\cos \theta$ розроблено схему пристрою для визначення тиску в краплі на поверхні твердого тіла (рис. 3).

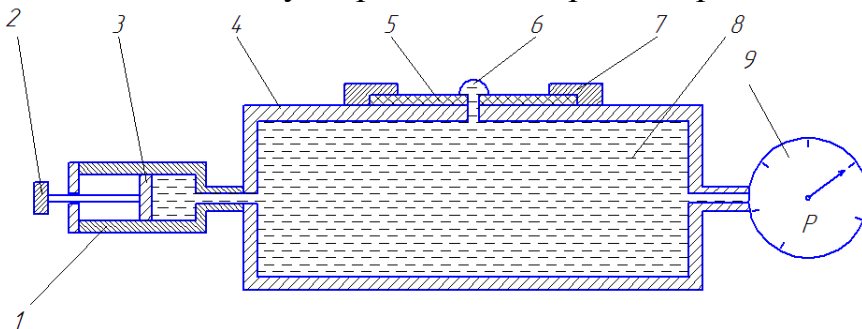


Рис. 3. Будова пристрою для дослідження тиску в краплі, де:
1 – дозатор; 2 – ручка; 3 – поршень; 4 – камера; 5 – об'єкт контролю; 6 – крапля рідини;
7 – фіксатор; 8 – досліджувана рідина; 9 – вимірювальний прилад

Перед початком вимірювання в камері 4 встановлюється ручкою 2 дозатора такий тиск, щоб меніск досліджуваної рідини в отворі опинився на одному рівні із зовнішньою поверхнею камери 4.

Дальше встановлюється пластинка 5 із досліджуваного матеріалу на поверхню камери 4 та притискується фіксатором 7 для забезпечення герметичності. Фіксатор 7 забезпечує встановлення пластинки 5 у визначене фіксоване положення на поверхні камери так, щоб отвори пластинки і в камери співпадали. За допомогою ручки 2 дозатора збільшується тиск у камері до тих пір, щоб на поверхні пластинки утворилась крапля визначеного об'єму, який визначається за величиною переміщення поршня 3 при його відомому діаметрі. Тоді знімаються значення величини тиску в краплі за показами вимірювального приладу 9.

Методика визначення $\cos \theta$ полягає у наступному:

- 1) за відомим значенням поверхневого натягу σ і густини ρ досліджуваної рідини розраховують параметр a^2 ;
- 2) для одержання значення a вибирають такий об'єм краплі V , щоб значення параметра a було рівне одному із значень в ряду 0,5, 1,0, 1,5, 2,0;
- 3) витискують краплю розрахованого об'єму на поверхню твердого тіла і вимірюють надлишковий тиск в краплі (в капілярі, який з'єднує краплю з пристроєм її утворення);
- 4) за отриманим значенням тиску P визначають згідно (4) крайовий кут змочування θ .

Ключові слова: адгезія; крайовий кут змочування; поверхневий натяг.

Література.

- [1] І. С. Кісіль, Р. Т. Боднар, В. Б. Біліщук, О. Б. Барна та Л. А. Витвицька, Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз. Т. 2. Методи обертової краплі, розгорнутого меніска, витягування тіл, крайового кута змочування. Івано-Франківськ, Україна: Видавництво Івано-Франківського університету нафти і газу, 2018.
- [2] І. С. Кісіль та Р. І. Кісіль, Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз: Монографія: У 2-х т. Т. 1. Методи максимального тиску у бульбашці, лежачої і висячої крапель та об'єму краплі. Івано-Франківськ, Україна: Видавництво Івано-Франківського університету нафти і газу, 2010.

УДК 004.94+519.246.8

ЕРГОДИЧНІ УМОВНІ ЛІНІЙНІ ВИПАДКОВІ ПРОЦЕСИ ЯК МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

¹⁾Фриз М. Є., ²⁾Щербак Л. М.

¹⁾Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, Тернопіль, Україна

²⁾Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, Україна

E-mail: mykh.fryz@gmail.com, prof_scherbak@ukr.net

Умовний лінійний випадковий процес (УЛВП) є зображуваним за означенням у вигляді стохастичного інтеграла з випадковим ядром за процесом із незалежними приростами [1], [2]. Він використовується для задач математичного моделювання, комп'ютерного імітаційного моделювання, статистичного аналізу та прогнозування інформаційних сигналів і процесів, які,

відповідно до фізичної природи їх породження, можуть бути представлені у вигляді суми багатьох випадкових стохастично залежних імпульсів, що виникають у пуассонівські моменти часу. УЛВП як математична модель досліджуваного сигналу враховує фізичну природу його генерації. Моделі у вигляді УЛВП застосовуються в галузі інформаційно-вимірвальних технологій для задач математичного моделювання та аналізу електрофізіологічних інформаційних сигналів, радіолокаційних перешкод, динамічних навантажень механічних систем, прогнозування енергетичних навантажень і споживання, споживання води, тощо [3]–[5]. Умовний лінійний випадковий процес є узагальненням відомої моделі лінійного випадкового процесу, що має аналогічне інтегральне представлення, але з не випадковим ядром, і внаслідок цього її можна використовувати лише для математичного моделювання сигналів або процесів, зображуваних у вигляді суми незалежних імпульсів. Умовні лінійні випадкові процеси порівняно з їх лінійними аналогами враховують умовну гетероскедастичність досліджуваних сигналів, що важливо для застосування інформаційно-вимірвальних технологій у економіці, медицині та енергетиці.

Ергодичність завжди є важливою властивістю математичних моделей і необхідною для задач обробки інформаційного сигналу, коли стоїть завдання оцінювання параметрів сигналу або системи. Ергодичність дозволяє використовувати усереднення за часом (усереднення за одною реалізацією сигналу) для оцінки цих параметрів. Це особливо важливо при роботі з нестационарними сигналами або системами, що змінюються в часі. Ергодичність тісно пов'язана з поняттям стаціонарності. Припущення ергодичності є основоположним для моделювання систем зв'язку та аналізу стохастичних шумів в інформаційно-вимірвальних технологіях, застосуваннях до фінансової математики, тощо.

Дуже часто ергодичність досліджуваного сигналу є лише гіпотезою чи припущенням. Однак, це є характерною властивістю лінійних випадкових процесів. Крім того, для лінійних випадкових процесів характерною є властивість перемішування. У доступній літературі ми не знайшли таких властивостей щодо УЛВП. Таким чином, актуальною задачею є вивчення властивостей ергодичності та перемішування УЛВП.

Метою доповіді є обґрунтування умов ергодичності стаціонарного умовного лінійного випадкового процесу з неперервним часом, що є наслідком властивості перемішування з використанням відомого зображення багатовимірної характеристичної функції УЛВП [6].

Обґрунтування здійснено у такій послідовності:

- зображення багатовимірної характеристичної функції УЛВП з породжуючим процесом Леві;
- встановлення умов стаціонарності у вузькому розумінні;
- аналіз властивостей ергодичності та перемішування стаціонарних випадкових процесів методом характеристичних функцій;

— обґрунтування властивості перемішування стаціонарного УЛВП із неперервним часом.

Ключові слова: математична модель, інформаційний сигнал, умовний лінійний випадковий процес, ергодичність, перемішування.

Література

- [1] P. A. Pierre, “Central Limit Theorems for Conditionally Linear Random Processes,” *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 20, no. 3, pp. 449–461, 1971, DOI: 10.1137/0120048.
- [2] M. Fryz and B. Mlynko, “Properties of Stationarity and Cyclostationarity of Conditional Linear Random Processes,” in *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2020, pp. 166–170. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235415.
- [3] M. Fryz, L. Scherbak, B. Mlynko, and T. Mykhailovych, “Linear Random Process Model-Based EEG Classification Using Machine Learning Techniques,” in *Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023)*, 2023, vol. 3468, pp. 126–132.
- [4] V. Babak, A. Zaporozhets, S. Kovtun, Y. Kuts, M. Fryz, and L. Scherbak, “Information Provision for Monitoring the Current State of Electric Power Facilities,” in *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*, M. Bezuglyi, N. Bouraou, V. Mykytenko, G. Tymchyk, and A. Zaporozhets, Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 283–309. doi: 10.1007/978-3-031-44347-3_8.
- [5] M. Fryz and B. Mlynko, “Property Analysis of Conditional Linear Random Process as a Mathematical Model of Cyclostationary Signal,” in *2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022)*, 2022, vol. 3309, pp. 77–82.
- [6] M. Fryz, S. Kharchenko, and L. Scherbak, “Ergodicity and Mixing of Conditional Linear Random Processes in the Problems of Information Signal Modelling and Analysis,” in *3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2023*, 2023, vol. 3628, pp. 306 – 314.

УДК 681.518.3

ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Денисюк В. Ю.

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

E-mail: v.denysiuk@lntu.edu.ua

Структурна, конструктивна та алгоритмічна складність сучасних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) зумовлює вимогу гарантувати необхідний рівень їхньої метрологічної надійності, що визначає властивість засобів вимірювання (ЗВ) зберігати метрологічні характеристики з часом у межах нормативів, встановлених у певних режимах та умовах експлуатації, зберігання та транспортування.

Метрологічна надійність ІВС визначається метрологічною надійністю блоків, що входять у вимірювальний канал ІВС. Важливе місце у сучасній структурі ВК займає блок аналого-цифрового перетворення (АЦП). Основними вимогами, що пред’являються до цього блоку, є висока точність і широта

функціональних можливостей. Для кількісної оцінки метрологічної надійності блоку АЦП та ІВС загалом найчастіше використовується показник метрологічного ресурсу.

Важливою проблемою, що вирішується під час проектування ІВС та її блоків, що входять до вимірювального каналу ІВС, є проведення метрологічного аналізу, що полягає в узгодженні бази апріорних знань з вирішуваним завданням з оцінки точності і метрологічної надійності проєктованого вимірювального засобу з урахуванням його функціональних можливостей [1, 2].

Основна тенденція розвитку вимірювань в автоматизованому виробництві – це перехід до машинного контролю за адаптивними моделями, до застосування складніших інформаційно-вимірювальних та керуючих систем. У зв'язку з цим різко зростає значення метрологічних характеристик вимірювальних каналів, що враховують метрологічні характеристики всіх блоків, що включені у вимірювальний канал. Для того щоб отримати інформацію про параметри об'єкта, необхідно проводити комплексні вимірювання, а значення вимірюваної величини одержувати розрахунковим шляхом на основі відомих функціональних залежностей між нею та величинами, що піддаються вимірюванням [3]. Зазначені завдання успішно вирішуються за допомогою ІВС. ІВС доцільно розглядати з двох позицій: структурної та функціональної. Перша відображає інтегрування різних підсистем, широке використання засобів обчислювальної техніки, що призводить до виникнення систем із гнучкою структурою. Друга характеризує зростання числа функцій, що виконуються системою. При цьому центр ваги переноситься з вимірювальних функцій на інші інформаційні функції, пов'язані з використанням результатів вимірювань. В ІВС вимірювання нерозривно пов'язано з такими функціями як логічна обробка, аналіз результатів вимірювання та його виділення не завжди можливе. Найбільшою структурною одиницею ІВС, для якої можуть нормуватися метрологічні характеристики, є вимірювальний канал, який являє собою послідовне з'єднання ЗВ.

Таке з'єднання ЗВ дозволяє виконувати закінчену функцію від сприйняття вимірюваної величини до індикації або реєстрації результату вимірювань включно, або перетворення його на сигнал, зручний для введення у цифровий обчислювальний пристрій, що входить до складу ІВС. Однією із найважливіших характеристик якості ЗВ є метрологічна надійність. Під метрологічною надійністю розуміють властивість ЗВ, у тому числі ІВС, зберігати в часі метрологічні характеристики в межах встановлених норм при експлуатації в заданих режимах та умовах використання, технічне обслуговування, зберігання та транспортування. Отже, метрологічна надійність визначається характером та темпом зміни нормованих характеристик досліджуваного ЗВ.

Ускладнення вимірювальної апаратури, підвищені вимоги до точності, застосування якісно нових елементів та зростаюча роль ІВС у виробничому

процесі ставлять завдання розробки науково обґрунтованих методів оцінки метрологічної надійності проєктованих ІВС до найважливіших завдань теоретичної та практичної метрології.

Для оцінки метрологічної надійності ЗВ запропоновано низку показників: метрологічний ресурс, показник інформаційної надійності, показник частки вірних вимірювань з урахуванням поступових метрологічних відмов, показники частоти відмов та швидкості зміни частоти відмов, ймовірність метрологічної справності, коефіцієнт метрологічної справності та ряд інших.

Виходячи з особливостей кожного з названих вище показників, можна визначити базове положення, що приймається при оцінці метрологічної надійності: основним процесом, що визначає метрологічну надійність засобів вимірювання, є нестационарний випадковий процес зміни в метрологічній нормованій характеристики досліджуваного засобу вимірювання з монотонно змінюваним у часі її математичним очікуванням, що призводить до метрологічної відмови.

Таким чином, основою для побудови теорії метрологічної надійності ЗВ, у тому числі ІВС, має бути глибоке вивчення нестационарного випадкового процесу зміни в часі досліджуваної метрологічної характеристики процесу зростання в часі основної похибки досліджуваних ЗВ.

З фізичної точки зору старіння будь-якого ЗВ є процесом його взаємодії з навколишнім середовищем, що призводить до зміни його властивостей. В основному ці зміни відбуваються тому, що при виготовленні всіх елементів ЗВ їх матеріал піддається фізичним впливам, які призводять до тих чи інших механізмів накопичення енергії в речовині, при цьому з часом відбувається поступове вивільнення цих внесених запасів енергії – розсмоктовуються внутрішні напруження, відбувається перекристалізація полімеризація матеріалів, релаксаційні процеси в них тощо.

Параметром, що в першу чергу визначає довгострокову метрологічну роботоздатність ЗВ, є величина запасу нормованої межі допустимої похибки ЗВ по відношенню до її фактичного значення. Зростання у часі похибки різних типів ЗВ підтверджується численними статистичними даними. Застосування математичного апарату теорії прогнозування розглядається як для апріорної оцінки метрологічної надійності засобу вимірювання при їх проєктуванні, так і для майбутньої після чергової метрологічної перевірки роботи засобу вимірювання протягом наступного міжповірочного інтервалу на етапі експлуатації.

Відомо, що отримання даних про процеси старіння ЗВ можливе експериментальним шляхом або методами математичного моделювання. Існує принципова складність експериментального оцінювання метрологічної надійності ЗВ, оскільки абсолютна більшість ЗВ має досить тривалий технічний ресурс. Визначити вид процесу зміни у часі метрологічної характеристики можна лише завдяки вивченню поведінки великої кількості екземплярів ЗВ одного типу протягом кількох років. Прискорені випробування ЗВ можливі

далеко не завжди.

У зв'язку з цим, при вирішенні задачі оцінки та прогнозування стану метрологічних характеристик, що визначають метрологічну надійність проєктованих ЗВ, все більшої ваги набуває математичне моделювання. Точність прогнозів, що виконуються на основі математичних моделей процесів зміни в часі метрологічних характеристик, буде природно обмеженою і повинна розглядатися тільки в ймовірнісному аспекті. Однак результати таких прогнозів можуть мати велике значення при вирішенні різних практичних завдань, а саме: визначення термінів профілактичних перевірок та необхідної кількості вимірювань метрологічних характеристик під час перевірок; обчислення можливого метрологічного ресурсу групи ЗВ на основі отриманих під час моделювання процесів зміни метрологічних характеристик; при розробленні рекомендацій щодо підвищення точності та метрологічної надійності ЗВ на етапі проєктування; розроблення ЗВ із заданим рівнем метрологічної надійності тощо.

Визначальною структурою в сучасних ІВС є АЦП. Питання оцінки та прогнозування метрологічної надійності блоків АЦП є виключно актуальними в даний час. Блок АЦП в структурі ІВС являє собою пристрій, який дозволяє здійснювати прийом та обробку сигналів аналогового типу з наступною трансформацією в цифрові послідовності чи цифровий код. Однак існує клас таких пристроїв, як високоінтегровані мікроконвертори, які суттєво дозволяють спростити побудову засобів вимірювань і формувати сигнал цифрової форми, минаючи класичні блоки, що є у структурі АЦП. У таких пристроях на єдиному кристалі інтегрована і вимірювальна частина, і частина цифрової обробки сигналу. Це дає можливість досить широко використовувати такі пристрої у засобах вимірювань та одержувати на основі їх ІВС, що володіють досить високим рівнем метрологічної надійності.

При побудові таких ЗВ та вище згаданих, основна ідеологія полягає у наступному підході, а саме перетворення сигналів безперервної структури у вигляді заданої функції $\xi(t)$, яка описує вхідний сигнал, у послідовність певних цифрових значень $\{\xi'(t_\phi)\}$, $\phi = 0,1,2,\dots$, що складаються з наступних процедурних операцій: подання безперервної функції деякою сукупністю значень дискрет при певних наборах аргументів; розбиття діапазону вимірюваної величини на визначене число рівнів із наступним округленням до найближчих рівнів.

Слід зазначити, що дослідження різних видів таких блоків з позиції оцінки їхнього метрологічного рівня на етапі проєктування безумовно пов'язане з використанням різних прийомів та методів математичного моделювання, що враховують у кожному конкретному випадку особливості їх функціонування та структури.

Таким чином, основним напрямом досліджень з оцінки метрологічної надійності ІВС і блоків, що входять до їх складу, у тому числі і АЦП, слід вважати використання прийомів математичного моделювання та методів

прогнозування для побудови адекватного та доступного для практичного використання математичного опису процесів зміни в часі метрологічних характеристик різних груп ЗВ, у тому числі і АЦП, а також вирішення на основі побудованих математичних моделей цілого ряду важливих у теоретичному та практичному відношенні задач.

Ключові слова: метрологічна надійність, проектування, моделювання, блок АЦП.

Література

- [1] Н. М. Зашепкіна, О. В. Шульга, О. А. Наконечний, *Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб.* Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
- [2] В. О. Яцук, Т. З. Бубела, М. М. Микійчук, Є. В. Походило, “Забезпечення метрологічної надійності в розпорощених вимірювальних системах”, *Вимірювальна техніка та метрологія*, Т. 79, Вип. 3, с. 71-82, 2018.
- [3] В. Ю. Денисюк, В. П. Симонюк, Ю. С. Лапченко, Б. І. Новосад, “Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки”, *Перспективні технології та прилади: зб. статей.* Вип. 16, с. 38-47, 2020.

УДК 621.3.082.72

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРВИНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ФЛЮКСИМЕТРУ

Повишенко О. А., Паздрій О. Я., Баженов В. Г.

Національний технічний університет України

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

E-mail: scela2472@gmail.com, olgapazdri@gmail.com, vgbazhenov@gmail.com

Необхідність вимірювання напруженості електростатичного поля у низькому вимірювальному діапазоні до 1 кВ/м обумовлено розвитком технології розробки інтегральних схем, розміри внутрішніх компонентів цих пристроїв зменшуються і стають більш чутливими до електростатичного розряду. В [1] показано тенденцію зниження порогу чутливості мікросхем до стандартизованих рівнів тестів CDM (модель зарядженого пристрою). Аналіз даних, показує, що очікується значне зниження цільових рівнів CDM електростатичного розряду, що потребує вимірювання напруженості електростатичного поля у низькому вимірювальному діапазоні (<50 В) для розробки систем моніторингу електростатики.

Виникнення електростатичного розряду між зарядженим тілом та електронним пристроєм призводить до його часткового або повного пошкодження. Це може мати серйозні наслідки, особливо під час експлуатації пристрою. Момент виникнення електричного розряду важко передбачити, а локалізувати об'єкт, що його накопичив досить складно. Тому, постає необхідність у вдосконаленні існуючих та розробці нових первинних

вимірювальних перетворювачів електростатичного флюксиметру (ЕФ) з підвищеною точністю у низькому вимірювальному діапазоні (до 1 кВ/м).

Робота є продовженням попереднього дослідження, направлено на підвищення чутливості первинного вимірювального перетворювача (сенсора) ЕФ у низькому вимірювальному діапазоні (до 1 кВ/м) [2], де запропоновано вдосконалене рівняння перетворення напруженості електростатичного поля в струм, яким описується робота сенсора ЕФ.

В даному дослідженні для порівняння вдосконаленого рівняння перетворення з типовим, було проведено комп'ютерне моделювання розподілу електростатичного поля між чутливими та екрануючими пластинами первинного вимірювального перетворювача ЕФ і встановлено чисельні значення індукованого на сенсорній пластині заряду та розраховано значення індукованого струму. Для встановлення фактичного значення індукованого струму було побудовано комп'ютерну модель та проведено імітаційне моделювання сенсору ЕФ. Для побудови та розрахунку числової моделі сенсора було використано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics. На основі побудованої комп'ютерної моделі (рис 1), були проведені дослідження сенсору ЕФ для визначення чисельного значення індукованого струму. В результаті яких було встановлено, що виникнення крайових ефектів призводить до появи методичної похибки, яка виникає за рахунок того, що середній індукований струм є меншим в порівнянні з розрахунковим значенням.

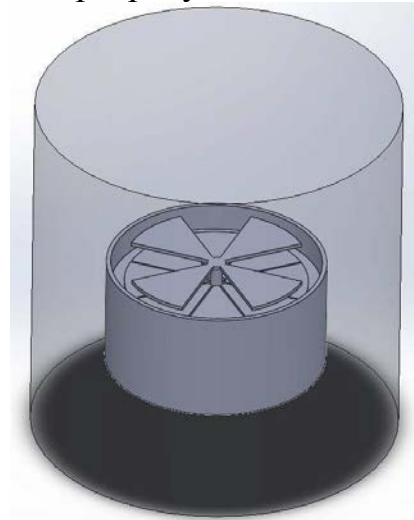


Рис. 1. Вигляд досліджуваної імітаційної моделі сенсору електростатичного флюксиметру

В результаті проведеного комп'ютерного моделювання сенсору ЕФ для визначення значення оптимальної кількості секторів було встановлено, що для запропонованої конструкції сенсору ЕФ, оптимальна кількість секторів становить шість. Встановлено, що оптимальне значення відстані між чутливими пластинами і екранованим ротором повинно бути в діапазоні від 2,5-3 мм для забезпечення максимальної чутливості сенсору ЕФ та його безпечно використання.

Визначені оптимальні параметри геометричної конфігурації ЕФ дозволять сформувані необхідні вимоги до побудови вдосконалених вимірювачів напруженості електростатичного поля у низькому динамічному діапазоні (до 1 кВ/м). Перспективним напрямком застосування таких приладів на виробництві буде розробка вдосконаленої інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу напруженості електростатичного поля, що дозволить попередити виникнення небезпечної ситуації.

Ключові слова: напруженість електростатичного поля, електростатичний флюксиметр, вимірювання, комп'ютерне моделювання, інформаційно-вимірювальна система.

Література

- [1] A. Righter, B. Carn та EOS/ESD Association, Inc., «A Look at the New ANSI/ESDA/JEDEC JS-002 CDM Test Standard,» т. 51, pp. 11-15, Oct. 2017.
- [2] V. Bazhenov and O. Povcshenko, “Methodological features of calculating errors in the measurement of electrostatic field strength”, Bull. Kyiv Polytech. Institute. Ser. Instrum. Making, no. 65(1), pp. 65–72, Jun. 2023. [https://doi.org/10.20535/1970.65\(1\).2023.283358](https://doi.org/10.20535/1970.65(1).2023.283358)

УДК 543.555 + 621.3.08

ОЦІНЮВАННЯ ЗСУВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ДВОХЕЛЕКТРОДНОЇ КОМІРКИ. ВИКЛИКАНОГО НАЯВНІСТЮ ОТВОРІВ ДЛЯ ЗАПОВНЕННЯ. РОЗМІЩЕНИХ В ЕЛЕКТРОДАХ КОМІРКИ

Стеннік О. Ю.

ДП «Укрметртестстандарт», Київ, Україна

E-mail: metrology@protonmail.com

Для відтворення одиниці електролітичної провідності рідин (ЕПР) k (См·м⁻¹) національні метрологічні інститути (НМІ) зазвичай використовують контактні диференційні двохелектродні кондуктометричні комірки з чітко визначеною геометрією. Відомо декілька конструкцій таких комірок: комірка зі змінною центральною подовжувальною секцією [1]–[7], комірка поршневого типу [6]–[10] та диференційна подвійна комірка [11].

Найбільшу популярність серед НМІ набула конструкція зі змінною центральною подовжувальною секцією. Центральна частина такої комірки містить фланцеві з'єднання і може зніматися. Ця здатність дозволяє змінювати відстань між електродами, тим самим змінюючи електричний опір комірки. Алгоритм роботи полягає в наступному: спочатку вимірюється опір комірки R_{m1} (Ом) без центральної секції при довжині стовпа рідини $2l$ (м). Потім довжину стовпа рідини збільшують до $2l+L$ (м), розміщуючи центральну секцію між двома напівкомірками, і вимірюють опір R_{m2} (Ом). ЕПР виражається наступним чином [8]–[10]:

$$k = \frac{L}{A} \frac{1}{R_{m2} - R_{m1}} = \frac{4L}{\pi D^2} \frac{1}{R_{m2} - R_{m1}}, \quad (1)$$

де A (м^2) – площа поперечного перетину, D (м) – внутрішній діаметр комірки, а L (м) – довжина «віртуального» стовпа рідини. Таким чином, принцип реалізації одиниці ЕПР k ($\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$) такою коміркою полягає у вимірюванні електричного опору «віртуального» стовпа рідини чітко визначеної геометрії за умови рівномірного розподілу густини струму J ($\text{А}\cdot\text{м}^{-2}$).

В реальних режимах вимірювань, для конструкції, що містить фланцеві з'єднання, важко забезпечити рівномірний розподіл щільності струму J ($\text{А}\cdot\text{м}^{-2}$) через можливі радіальні зсуви секцій комірки одна відносно одної. Методична похибка вимірювання з використанням комірки такої конструкції може сягати 0,08 % при радіальному зсуві секцій в 0,6 мм [12].

Найпростішим і найдешевшим варіантом первинного комірки, яка не містить фланцевих з'єднань, є двохелектродна диференційна подвійна комірка [11]. Конструктивно такий сенсор складається з двох комірок різної довжини L_1 (м) і L_2 (м), але однакового внутрішнього діаметра D (м) (Рис. 1).

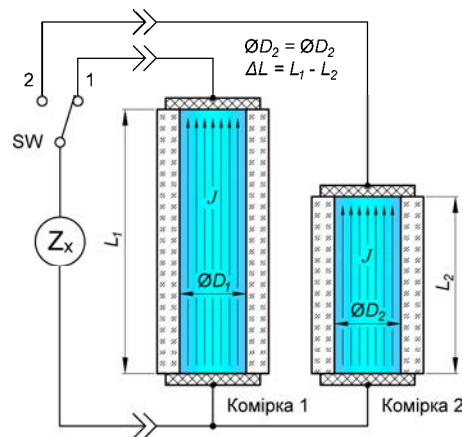


Рис. 1. Фізична модель диференційної подвійної комірки.

Всі чотири електроди в обох комірках нерухомі, а тому стовпи рідини в такій диференційній комірці мають постійну «заморожену» геометрію. Наявність отворів для заповнення в стінці комірок (Рис. 2а) призводить до порушення рівномірності густини розподілу струму J ($\text{А}\cdot\text{м}^{-2}$) всередині стовпа рідини. Це в свою чергу призводить до зсуву електричного опору заповненої комірки відносно опору ідеалізованої моделі з однорідним полем (без отворів) на відносне значення δ_R (%):

$$\delta_R = \frac{R_w - R_{wo}}{R_{wo}} \cdot 100, \quad (2)$$

де R_w (Ω) – це опір комірки, що має отвори для заповнення, а R_{wo} (Ω) – це опір ідеалізованої моделі комірки з однорідним полем всередині, розрахований за наступним виразом [1]:

$$R_{wo} = \frac{L}{A} \frac{1}{k} = \frac{4L}{\pi D^2} \frac{1}{k}. \quad (3)$$

Оскільки діаметр отворів для заповнення комірки та їх положення можна виміряти, зсув опору δ_R (%) (2) можна теоретично розрахувати методом скінченних елементів та використовувати як поправку. Такі дослідження були проведені для конструкції комірки з боковим підведенням рідини [11]. Однак існує інший тип конструкції, коли отвори для заповнення комірки розташовані в електродах (Рис. 2, б).

Тому мета досліджень полягає у встановленні кількісних характеристик похибки вимірювання опору для комірки з отворами для заповнення, розташованих в електродах (Рис. 2, б) та порівнянні цих характеристик з характеристиками аналогічної конструкції (Рис. 2, а).

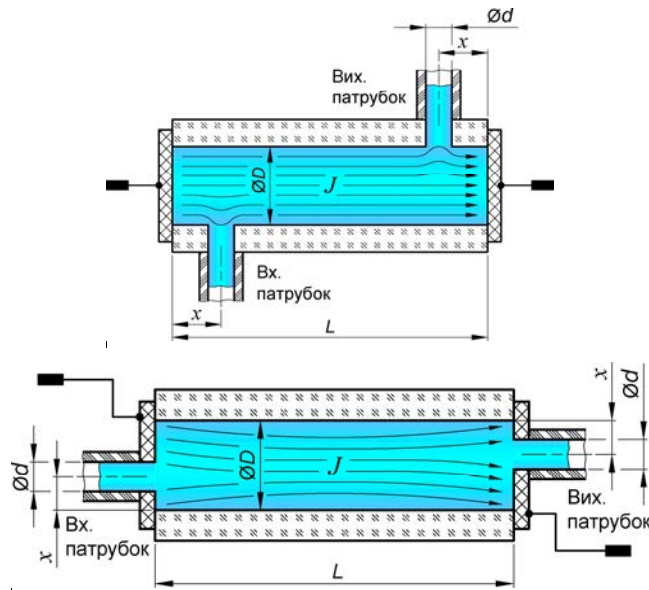


Рис. 2. Фізичні моделі кондуктометричних комірок із отворами для заповнення.

За результатами моделювання з використанням методу скінченних елементів було побудовано графіки залежностей (Рис. 3) зсуву опору δ_R (%) (2) для ряду геометричних параметрів моделі Рис. 2, б.

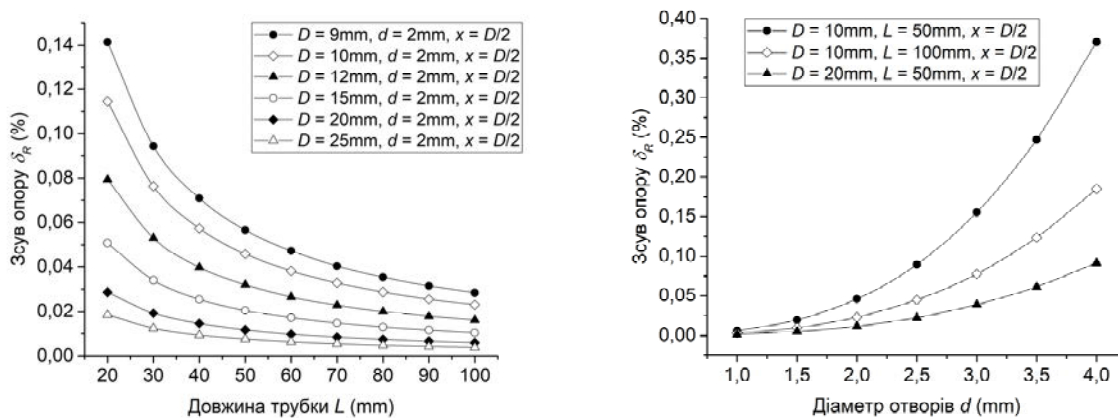


Рис. 3. Залежності зсуву опору δ_R (%) від різних параметрів комірки.

Аналіз графіків залежностей показує, що на відміну від моделі з отворами в стінці комірки [11], модель з отворами в електродах має позитивне значення зсуву. За абсолютним значенням, зсуви близькі, але для більшості геометричних параметрів, зсув опору δ_R (%) моделі Рис. 2б на 3÷5 % менший. При збільшенні діаметра отворів d (мм) в 4 рази зсув опору збільшується в 10–35 разів залежно від величини відношень D/d і L/D .

Ключові слова: кондуктометрия, електролітична провідність, кондуктометрична комірка, похибка, отвори для заповнення, метод скінченних елементів.

Література:

- [1] R. H. Shreiner, K. W. Pratt, “Standard reference materials: Primary standards and standard reference materials for electrolytic conductivity”, in: *NIST Special Publication 260-142.*, 2004 Ed. U.S. Government Printing Office, Washington, 2004.
- [2] C. Thirstrup, L. Deleebeeck, Review on electrolytic conductivity sensors, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1–22, 2021. DOI: 10.1109/TIM.2021.3083562
- [3] T. Asakai, I. Maksimov, S. Onuma, T. Suzuki, T. Miura, A. Hioki, New Japanese certified reference materials for electrolytic conductivity measurements, *Accreditation Qual. Assur.*, vol. 22, pp. 73–81, 2017. DOI: 10.1007/s00769-017-1253-0
- [4] E. Orrù, F. Durbiano, M. Ortolano, Reference measurement system for low electrolytic conductivity values with a flowing solution, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24 (2013) 035903. DOI: 10.1088/0957-0233/24/3/035903
- [5] E. Orrù, Traceability of electrolytic conductivity measurements for ultra pure water. PhD thesis (2014). DOI: 10.6092/polito/porto/2553145
- [6] F. Brinkmann, N.E. Dam, E. Deák, F. Durbiano, E. Ferrara, J. Fűkő, H. D. Jensen, M. Máriássy, (+ 5 more author), Primary methods for the measurement of electrolytic conductivity, *Accreditation Qual. Assur.*, vol. 8, pp. 346–353, 2003. DOI: 10.1007/s00769-003-0645-5
- [7] P. Spitzer, S. Seitz, Electrolytic conductivity, in: *Handbook of metrology and testing.* H. Czichos, T. Saito, L. Smith. Springer, Heidelberg, 2011, ISBN: 978-3-642-16640-2, pp. 498–507.
- [8] I. C. S. Fraga, P. P. Borges, B. S. R. Marques, W. B. S. Junior, S. P. Sobral, C. M. Ribeiro, J. C. Dias, J. C. Lopes, (+ 1 more author), Primary Measurements of Electrolytic Conductivity in Brazil, Proc. of Simposio de Metrología 2008, Santiago de Querétaro, México, 22 – 24 October 2008.
- [9] I. C. S. Fraga, J. C. Lopes, L. R. Cordeiro, L. F. Silva, P. P. Borges, “Evaluation of the stability of solutions of low electrolytic conductivity by primary measurements”, *J. Solution Chem.*, vol. 44, pp. 1920–1936, 2015. DOI: 10.1007/s10953-015-0384-3
- [10] K. C. Cunha, L. S. Pardellas, F. B. Gonzaga, Stability monitoring of electrolytic conductivity reference materials under repeated use conditions by the primary measurement method, *J. Solution Chem.*, vol. 49, pp. 306–315, 2020. DOI: 10.1007/s10953-020-00961-9
- [11] O. Stennik, O. Mikhal, “Resistance bias estimation of a liquid column in a cylindrical conductivity cell with lateral liquid supply”, *Eng. Res. Express*, vol. 6 (2024), 015079. DOI: 10.1088/2631-8695/ad1f12
O. Mikhal, D. Meleshchuk, O. Stennik, “Methodological errors due to a non-cylindrical surface in a Jones-type cell with a removable central extension tube”, *Acta IMEKO*, vol. 12, no. 4, 24, 2023. DOI: 10.21014/actaimeko.v12i4.1604

УДК 543.555 + 621.3.08

НОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ РІДИН З ФУНКЦІЄЮ КОНТРОЛЮ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ІМПЕДАНСУ

Стеннік О. Ю.

ДП «Укрметртестстандарт», Київ, Україна

E-mail: metrology@protonmail.com

Для відтворення одиниці електролітичної провідності рідин (ЕПР) k (См·м⁻¹) національними метрологічними інститутами (НМІ) застосовуються кондуктометричні комірки чотирьох основних конструкцій: комірки зі знімною центральною подовжувальною секцією [1]–[7], поршневі комірки [6]–[10], чотириелектродні комірки [6] та диференціальні подвійні комірки [11]. Кожен із цих типів комірок має свої переваги та недоліки, але всі вони використовують один і той самий метод: диференціальний контактний метод вимірювання. Цей метод заснований на гіпотезі, що під час двох вимірювань опору поляризаційний імпеданс [12]–[14] межі електрод/розчин залишається незмінним і повністю усувається при використанні диференціального методу. Хоча кожен тип комірок має електроди з мінімальним поляризаційним імпедансом, вони все одно можуть відрізнитись через ряд дестабілізуючих факторів. Такими факторами можуть бути: різні значення вимірювального струму для двох довжин (l , отже, електричного опору) комірки, що є наслідком змін інтервалів діапазону вимірювання LCR-метра; зміни пористості поверхонь електродів; зміни в ефективній площі електродів через забруднення; або різниці температур під час використання диференціального методу. Таким чином, різні значення поляризаційного імпедансу під час двох вимірювань опору комірки призводять до неповної компенсації, що в свою чергу призводить до додаткової похибки у вимірюванні ЕПР.

Розглянемо опір кондуктометричної комірки на прикладі диференційної подвійної комірки (Рис. 1) у загальному вигляді.

Це комплексна величина; відповідно, основне рівняння диференціального методу має вигляд:

$$Z_{\text{CELL},1} - Z_{\text{CELL},2} = \text{Re}(Z_{\text{CELL},1} - Z_{\text{CELL},2}) + j\text{Im}(Z_{\text{CELL},1} - Z_{\text{CELL},2}) \cdot \quad (1)$$

Векторні аналізатори сигналів дозволяють отримувати результат окремо для активної та реактивної складових комірки. Тож маємо право записати:

$$\text{Re}(Z_{\text{CELL},1} - Z_{\text{CELL},2}) = (Z_{P1} - Z_{P2}) + (Z_{B1} - Z_{B2}) \cdot \quad (2)$$

Ефективність диференційного методу залежить від того, наскільки ми можемо вважати рівним нулю вираз в першій круглій скобці. Складові поляризаційного імпедансу кожної комірки Z_{P1} та Z_{P2} повинні мати мінімальні значення, бути температурно незалежними, бути однаковими або стабільними у часі на інтервалі двох вимірювань. Врахування всіх цих умов для ідеалізованої

моделі дозволяє вважати першу складову у круглих скобках рівняння (2) рівною нулю.

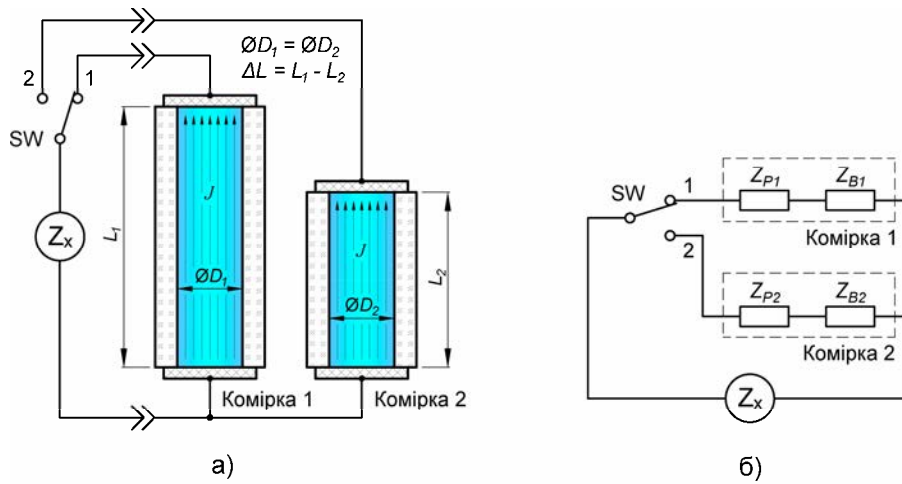


Рис. 1. а) фізична модель диференційної подвійної комірки, б) еквівалентна електрична схема.

Виходячи із наведеного, можемо записати:

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{CELL},1} - Z_{\text{CELL},2}) = (Z_{B1} - Z_{B2}) = R_1 - R_2. \quad (3)$$

В подальшому, аби не ускладнювати роботу з формулами, індекси P та B не будемо записувати. Але всюди, де використовуються результати вимірювань, необхідно пам'ятати, що мова йде про активну складову об'ємного імпедансу у двоелементній послідовній схемі заміщення.

Хоча диференційна комірка (Рис. 1(а) та 1(б)) має електроди із найменшим значенням поляризаційних імпедансів Z_{P1} та Z_{P2} , в реальному режимі вимірювань вони можуть мати різну величину через деякі раніше згадувані дестабілізуючі фактори. Таким чином поляризаційний імпеданс не буде скомпенсований повністю і вираз $(Z_{P1} - Z_{P2})$ рівняння (2) не буде дорівнювати нулю. Це призведе до додаткової похибки δ_{12} різниці результатів вимірювання електричних опорів ΔR_{12}^m (Ом), що буде виражатись наступним:

$$\Delta R_{12}^m = \Delta R_{12} + R_{P1} - R_{P2} = \Delta R_{12}(1 + \delta_{12}), \quad (7)$$

де ΔR_{12} (Ом) це різниця опорів, що не містить похибки δ_{12} . Виявити похибку δ_{12} існуючими методами та засобами не уявляється можливим, тож пропонується новий метод вимірювання ЕП з функцією контролю впливу поляризаційних імпедансів. Цей метод потребує надлишкової вимірювальної інформації шляхом додаткових вимірювань із різними значеннями констант комірки. Для реалізації такого варіаційного методу корекції похибки [15], існуюча конструкція із двох двохелектродних комірок доповнюється третьою коміркою, що також повинна мати однаковий з першими двома діаметр, але іншу довжину L_3 , Рис. 2(а). У випадку комірки поршневого типу, для цього потрібно виконати надмірну

кількість вимірювань із різними положеннями поршня L_1, L_2, L_3 відносно нижнього електрода Рис 2(б). Такий підхід до вимірювання дає можливість шляхом використання диференційного методу отримати три незалежних результати ЕП у вигляді різниці: першого і другого стовпа рідини k_{12} , першого і третього k_{13} та другого і третього k_{23} :

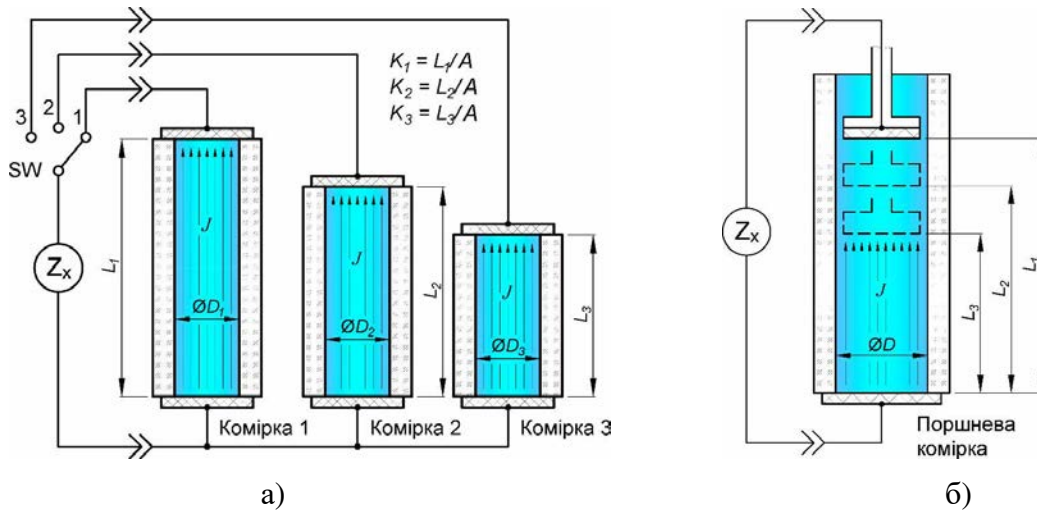


Рис. 2. Фізичні моделі диференційних комірок з функцією контролю однаковості значень поляризаційних імпедансів $\text{Re}(Z_x)$

$$\begin{cases} k_{12} = \frac{\Delta K_{12}}{\Delta R_{12}^m} = \frac{\Delta K_{12}}{\Delta R_{12} (1 + \delta_{12})} \\ k_{13} = \frac{\Delta K_{13}}{\Delta R_{13}^m} = \frac{\Delta K_{13}}{\Delta R_{13} (1 + \delta_{13})} \\ k_{23} = \frac{\Delta K_{23}}{\Delta R_{23}^m} = \frac{\Delta K_{23}}{\Delta R_{23} (1 + \delta_{23})} \end{cases} \quad (8)$$

Результати вимірювань будуть різними за значенням, оскільки похибки δ_{ij} , що зумовлені різницею поляризаційних імпедансів в загальному випадку мають різні величини. Застосуємо до результатів (2) першу варіаційну процедуру. Візьмемо відношення результатів (8) і зазначимо їх латинськими літерами. Для трьох значень ЕП отримаємо систему із трьох рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{k_{13}}{k_{12}} = \frac{\Delta K_{13}}{\Delta K_{12}} \frac{\Delta R_{12} (1 + \delta_{12})}{\Delta R_{13} (1 + \delta_{13})} = a \\ \frac{k_{23}}{k_{12}} = \frac{\Delta K_{23}}{\Delta K_{12}} \frac{\Delta R_{12} (1 + \delta_{12})}{\Delta R_{23} (1 + \delta_{23})} = b \\ \frac{k_{23}}{k_{13}} = \frac{\Delta K_{23}}{\Delta K_{13}} \frac{\Delta R_{13} (1 + \delta_{13})}{\Delta R_{23} (1 + \delta_{23})} = c \end{cases} \quad (9)$$

Для ідеальної моделі (коли поляризаційні імпеданси однакові) похибки від різниці поляризаційних імпедансів відсутні. Тоді всі значення ЕП в системі (8) будуть рівними, а коефіцієнти a, b та c будуть рівними одиниці. Відповідно система (9) перетворюється в наступну:

$$\begin{cases} \frac{\Delta R_{12}}{\Delta R_{13}} = \frac{\Delta K_{12}}{\Delta K_{13}} = \frac{\Delta L_{12}}{\Delta L_{13}} \\ \frac{\Delta R_{12}}{\Delta R_{23}} = \frac{\Delta K_{12}}{\Delta K_{23}} = \frac{\Delta L_{12}}{\Delta L_{23}} \\ \frac{\Delta R_{13}}{\Delta R_{23}} = \frac{\Delta K_{13}}{\Delta K_{23}} = \frac{\Delta L_{13}}{\Delta L_{23}} \end{cases} \quad (10)$$

Співвідношення (10) справедливі для ідеальної моделі і є умовою відсутності похибки від різниці поляризаційних імпедансів. Якщо співвідношення (10) підставити в (9), то отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{1 + \delta_{12}}{1 + \delta_{13}} = a \\ \frac{1 + \delta_{12}}{1 + \delta_{23}} = b \\ \frac{1 + \delta_{13}}{1 + \delta_{23}} = c \end{cases} \quad (11)$$

Система (9) могла би бути основою (три невідомі та три рівняння) для розв’язання відносно похибки δ_{ij} . Але рівняння в (11) не є незалежними. Кожне із рівнянь в системі нажаль є комбінацією двох інших рівнянь. Для пошуку незалежного рівняння застосовується двохстадійна процедура. На першій стадії використовується відомий диференційний метод для отримання трьох різних різниць опорів згідно (7). Далі визначається ЕП відповідно (8). На другій стадії використовується варіація іншого типу. Наприклад, береться різниця від різниць опорів першої і другої комірок та першої і третьої:

$$\Delta R_{12}^m - \Delta R_{13}^m = \Delta R_{12} - \Delta R_{13} + (R_{P1} - R_{P2}) - (R_{P1} - R_{P3}) = \Delta R_{12} - \Delta R_{13} - (R_{P2} - R_{P3}) \quad (12)$$

Зазначимо важливу властивість рівняння (12). Вона полягає у тому, що похибка різниці перших двох різниць визначається похибкою третьої різниці.

$$\Delta R_{23}^m = \Delta R_{23} + R_{P2} - R_{P3} \quad (13)$$

Тому підставивши в рівняння (12) результат $(R_{P2} - R_{P3})$, із рівняння (13) і отримуємо:

$$\Delta R_{12}^m - \Delta R_{13}^m + \Delta R_{23}^m = \frac{\Delta R_{12}^m}{1 + \delta_{12}} - \frac{\Delta R_{13}^m}{1 + \delta_{13}} + \frac{\Delta R_{23}^m}{1 + \delta_{23}} \quad (14)$$

Із останнього рівняння та системи (11) неважко отримати вирази для похибок вимірювання ЕП, що зумовлені неповною компенсацією поляризаційного імпедансу:

$$(1 + \delta_{12}) = \frac{\Delta R_{12}^m - a\Delta R_{13}^m + b\Delta R_{23}^m}{\Delta R_{12}^m - \Delta R_{13}^m + \Delta R_{23}^m} \quad (15)$$

$$(1 + \delta_{13}) = \frac{(1/a)\Delta R_{12}^m - \Delta R_{13}^m + c\Delta R_{23}^m}{\Delta R_{12}^m - \Delta R_{13}^m + \Delta R_{23}^m} \quad (16)$$

$$(1 + \delta_{23}) = \frac{(1/b)\Delta R_{12}^m - (1/c)\Delta R_{13}^m + \Delta R_{23}^m}{\Delta R_{12}^m - \Delta R_{13}^m + \Delta R_{23}^m} \quad (17)$$

Ключові слова: кондуктометрия, електролітична провідність, кондуктометрична комірка, похибка, поляризаційний імпеданс.

Література

- [1] R. H. Shreiner, K. W. Pratt, “Standard reference materials: Primary standards and standard reference materials for electrolytic conductivity”, in: *NIST Special Publication 260-142.*, 2004 Ed. U.S. Government Printing Office, Washington, 2004.
- [2] C. Thirstrup, L. Deleebeck, Review on electrolytic conductivity sensors, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70 (2021) pp. 1–22. DOI: [10.1109/TIM.2021.3083562](https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3083562)
- [3] T. Asakai, I. Maksimov, S. Onuma, T. Suzuki, T. Miura, A. Hioki, “New Japanese certified reference materials for electrolytic conductivity measurements”, *Accreditation Qual. Assur.*, 22, pp. 73–81, 2017. DOI: [10.1007/s00769-017-1253-0](https://doi.org/10.1007/s00769-017-1253-0)
- [4] E. Orrù, F. Durbiano, M. Ortolano, “Reference measurement system for low electrolytic conductivity values with a flowing solution”, *Meas. Sci. Technol.*, 24 (2013) 035903. DOI: [10.1088/0957-0233/24/3/035903](https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/3/035903)
- [5] E. Orrù, Traceability of electrolytic conductivity measurements for ultra pure water. PhD thesis (2014). DOI: [10.6092/polito/porto/2553145](https://doi.org/10.6092/polito/porto/2553145)
- [6] F. Brinkmann, N.E. Dam, E. Deák, F. Durbiano, E. Ferrara, J. Fűkő, H. D. Jensen, M. Máriássy, (+ 5 more author), “Primary methods for the measurement of electrolytic conductivity”, *Accreditation Qual. Assur.*, 8, pp. 346–353, 2003. DOI: [10.1007/s00769-003-0645-5](https://doi.org/10.1007/s00769-003-0645-5)
- [7] P. Spitzer, S. Seitz, “Electrolytic conductivity”, in: *Handbook of metrology and testing.* H. Czichos, T. Saito, L. Smith. Springer, Heidelberg, 2011, pp. 498–507.
- [8] I. C. S. Fraga, P. P. Borges, B. S. R. Marques, W. B. S. Junior, S. P. Sobral, C. M. Ribeiro, J. C. Dias, J. C. Lopes, (+ 1 more author), “Primary Measurements of Electrolytic Conductivity in Brazil”, *Proc. of Simposio de Metrología 2008*, Santiago de Querétaro, México, 22 – 24 October 2008.
- [9] I. C. S. Fraga, J. C. Lopes, L. R. Cordeiro, L. F. Silva, P. P. Borges, “Evaluation of the stability of solutions of low electrolytic conductivity by primary measurements”, *J. Solution Chem.*, 44, pp. 1920–1936, 2015. DOI: [10.1007/s10953-015-0384-3](https://doi.org/10.1007/s10953-015-0384-3)
- [10] K. C. Cunha, L. S. Pardellas, F. B. “Gonzaga, Stability monitoring of electrolytic conductivity reference materials under repeated use conditions by the primary measurement method”, *J. Solution Chem.* 49 (2020) pp. 306–315. DOI: [10.1007/s10953-020-00961-9](https://doi.org/10.1007/s10953-020-00961-9)
- [11] O. Stennik, O. Mikhal, R’esistance bias estimation of a liquid column in a cylindrical conductivity cell with lateral liquid supply”, *Eng. Res. Express*, 6 (2024), 015079. DOI: [10.1088/2631-8695/ad1f12](https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad1f12)
- [12] E. Barsoukov, J.R. Macdonald, A Review of: “Impedance Spectroscopy, Theory, Experiment, and Applications” Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., 111 River St., Hoboken, NJ, 07030, 2005, ISBN: 0-471-64749-7, 595 p. DOI: [10.1080/10426910500476796](https://doi.org/10.1080/10426910500476796)
- [13] A.J. Bard, L.R. Faulkner, *Electrochemical methods. Fundamentals and applications.* Second edition. John Wiley & Sons, 2001.
- [14] M. Becchi, L. Callegaro, F. Durbiano, V. D’Elia, A. Strigazzi, “Novel impedance cell for low conductive liquids: Determination of bulk and interface contributions”, *Rev. Sci. Instrum.* 78 (2007), pp. 113902–113902. DOI: [10.1063/1.2805195](https://doi.org/10.1063/1.2805195)
- [15] М. М. Сурду, З. Я. Монастирський, *Варіаційні методи підвищення точності вимірювачів імпедансу: монографія.* Київ, Україна: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. 385 с.

УДК: 681.5

ЗІР РОБОТІВ НА ОСНОВІ СТРОБОСКОПІЧНОГО ЕФЕКТУ

Федорченко С. В.

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

E-mail: mr.fedorchenko9789@gmail.com

Загальна постановка задачі. Одна з проблем, з якою стикаються роботи, оснащені камерами, це спотворення зображення при обертальному русі.

Постановка задачі дослідження. Розглянути систему визначення кутової швидкості двигуна.

Вирішення задачі.

Механізм стробоскопічного ефекту в робототехніці:

- Стробоскопічний ефект - це метод, що використовує періодичну фазову модуляцію світлових імпульсів на сенсорах робота для створення ілюзії повільного руху або сповільненого сприйняття.

- Ефект досягається через контрольовану часову модуляцію інтенсивності світла, синхронізовану з оновленням зображення на сенсорі.

- Математичний аспект: середня освітленість Π визначається як інтеграл від інтенсивності світла $I(t)I(t)$ за період імпульсів ТТ.

Стробоскопічний ефект виникає, коли частота спалахів світла f_s дорівнює або кратна частоті обертання об'єкта f_r .

Щоб отримати чітке зображення об'єкта на кожному кадрі, необхідно, щоб час експозиції камери t_e було менше часу спалаху світла t_s . Тоді можна записати такі умови [2]:

$$f_s = k f_r, t_e < t_s$$

де k – ціле число.

З першого умови можна виразити частоту спалахів світла через частоту обертання об'єкта:

$$f_s = \frac{k}{T_r},$$

де T_r – період обертання об'єкта.

З другої умови можна виразити час експозиції камери через час спалаху світла:

$$t_e < \frac{1}{f_s}.$$

Таким чином, для створення системи робототехнічного зору зі стробоскопічним ефектом необхідно знати або вимірювати частоту обертання об'єкта [1].

Застосування в робототехніці:

Розпізнавання рухомих об'єктів:

- Використовується для точнішого розпізнавання та відстеження швидко рухомих об'єктів, таких як автомобілі, люди та тварини.

- Стробоскопічний ефект дозволяє роботам покращити швидкість обробки зображень та діяти більш точно в динамічних сценаріях.

Аналіз деформації матеріалів:

- Використовується для моніторингу та аналізу деформацій матеріалів в реальному часі, що корисно в промисловості, будівництві та медицині.

- Стробоскопічний ефект дозволяє виявляти мікроскопічні зміни в матеріалах та запобігати їх пошкодженню або поломці.

Медична діагностика та хірургія:

- Використовується для аналізу руху органів та тканин, наприклад, при діагностиці серцевих захворювань або в хірургії для покращення видимості операційного поля.

- Стробоскопічний ефект допомагає візуалізувати швидкорухомі структури в тілах пацієнтів.

Розвідка та безпека:

- Використовується для виявлення та відстеження рухомих об'єктів в умовах обмеженої видимості, наприклад, при пошуку та порятунку або в військових операціях.

- Стробоскопічне зорове спостереження дозволяє роботам ефективно діяти в умовах низької освітленості або при наявності перешкод.

Виклики та перспективи:

- Синхронізація імпульсів: Потрібна точна синхронізація моментів випуску світлових імпульсів для ефективного застосування стробоскопічного ефекту.

- Обмеження роздільної здатності: Можливі обмеження в роздільній здатності зображення через короткі імпульси світла.

- Адаптація до умов освітлення: Потрібно розробляти методи адаптації стробоскопічного зору до різних умов освітлення для підвищення його ефективності.

Однією з основних областей застосування робототехнічного зору є виробничі лінії, де роботи можуть виконувати завдання, що вимагають високої точності та швидкості. Наприклад, роботи з робототехнічним зором можуть розпізнавати деталі на конвеєрі, визначати їхнє положення та орієнтацію, а потім виконувати маніпуляції, такі як збірка, сортування або обробка цих деталей.

Також робототехнічне зорове спостереження використовується у складних операціях, наприклад у роботах з лазерною або плазмовою різкою, де точність та відповідність геометричним параметрам є критичними.

В цілому, робототехнічне зорове спостереження в промисловості дозволяє автоматизувати та оптимізувати виробничі процеси, знижувати витрати та підвищувати якість продукції, роблячи промислові підприємства більш ефективними та конкурентоспроможними на ринку.

Висновки. Стробоскопічний ефект є потужним інструментом у зорових системах роботів, що дозволяє покращити їх можливості в різних галузях робототехніки.

Ключові слова: стробоскопічний ефект.

Література

- [1] [2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation \(ICRA\)](https://www.icra2023.org/)
<https://www.icra2023.org/>.
- [2] <https://studme.org/tehnika/>

УДК 621.316.1

**ЗАСТОСУВАННЯ ДИСКРЕТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА ДЛЯ
МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

*Малько В. П., Ковтун С. І., Куц Ю. В., Фриз М. Є., Щербак Л. М.
Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, Україна
E-mail: yovaviking03@gmail.com*

На сьогодні сучасна технічна інфраструктура надзвичайно залежить від надійного та якісного постачання електроенергії. Зростаючі вимоги до якості електроенергії ставлять перед виробниками електроенергії більш складні завдання стосовно стабільності та надійності електропостачання. Якість електроенергії забезпечується шляхом дотримання виробниками електроенергії нормованих показників якості за ДСТУ EN 50160:2023 [1], який встановлює допустимі та граничні значення показників якості електроенергії за яких зберігається працездатність електричних пристроїв та обладнання. Відхилення будь-якого з цих показників порушує роботу електричних пристроїв, призводить до несправності електронного обладнання, що проявляється у збоях роботи автоматики, виробничого обладнання і т. п.

Всі показники якості електроенергії умовно можна поділяються на 3 групи: до першої відносяться відхилення напруги та частоти від номінальних значень, до другої – коефіцієнти спотворення форми, до третьої – величина та тривалість провалів напруги, перенапруги і т. п. Для показників другої та третьої групи не існує єдиної методології їх вимірювання, тому пошук технічних рішень спрямованих на визначення з високою точністю таких показників якості залишається актуальним завданням.

Метою роботи є дослідження можливостей дискретного перетворення Гільберта (ДПГ) для визначення показників якості електроенергії третьої (амплітудно-часової) групи та оцінювання їх похибок.

Для визначення показників якості електроенергії застосовують лінійні інтегральні перетворення, до кола яких належать дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) та Вейвлет-перетворення. Ці перетворення широко використовують для визначення спотворень форми напруги, які оцінюються сумарним коефіцієнтом гармонічних спотворень (СКГС).

Для визначення показників якості третьої групи застосовувати ДПФ є неефективним оскільки воно не дає змоги аналізувати сигнали в амплітудно-часовій області та визначати інтервали часу, на яких відбувається спотворення

напруги електромережі. Неefективність застосування ДПФ для вимірювання таких показників якості електроенергії підтверджена шляхом модельних експериментів в роботі [2]. Натомість, авторами цієї роботи було запропоновано використання Вейвлет-перетворення, яке дає змогу представити напругу електромережі у вигляді двовимірної та тривимірної Вейвлет-спектрограми, на якій видно моменти часу появи порушень показників якості електроенергії. Але опрацювання таких спектрограм є складним процесом.

Інший приклад вимірювання тривалості спотворень показників якості третьої групи наведеної в роботі [3]. Авторами запропоновано в системах моніторингу якості електроенергії в децентралізованих системах електропостачання застосування Вейвлет-перетворення з послідовною декомпозицією аналізованого сигналу на частотно-впорядковані просторово-ортогональні рівні. Метод дає змогу виявити час виникнення спотворень сигналу та їх тривалість за рахунок порівняного послідовного зменшення масштабу, в результаті чого відбувається розбиття сигналу на частотні піддіапазони, що дає можливість проведення їх моніторинг у реальному часі.

Проведений аналіз робіт засвідчив, що ця тематика не втрачає актуальності. Значний практичний інтерес представляє пошук нових та вдосконалення відомих методів визначення показників якості електроенергії.

Постановка задачі дослідження

Необхідно проаналізувати ефективність застосування ДПГ для оцінювання показників якості електроенергії в мережах загальної призначеності шляхом проведення модельних експериментів з виявлення провалів напруги та перенапруги та визначень значень їх амплітуди та тривалості.

Моделювання провести для наступних вихідних даних: номінальне значення амплітуди мережевої напруги $U_n = 230$ В, номінальне значення частоти електромережі $f_n = 50$ Гц, частота дискретизації $f_d = 12,8$ кГц, період дискретизації $T_d = 78,125$ мкс, час аналізу $T_a = 0,16$ с.

Модель напруги в електромережах загальної призначеності

Для досягнення поставленої мети достатньо скористатись детермінованою моделлю гармонічного сигналу зі змінною в часі обвідною

$$u(t) = U(t) \cos(2\pi f_n j T_d t - \varphi), \varphi \in [0, 2\pi], t \in [0, T_a], \quad (1)$$

де $U(t)$ – обвідна сигналу, φ – початкова фаза гармонічної складової сигналу.

Амплітудні та часові показники якості електроенергії розраховуються за оцінкою в часі обвідної сигналу (1), яка визначається із застосуванням ДПГ [4]:

$$\hat{U}(t) = \sqrt{(u(t))^2 + (u_h(t))^2}, t \in [0, T_a], \quad (2)$$

де $u_h(t)$ – гільберт-образ сигналу (1).

Точність оцінювання амплітуди та тривалості проводилась за значеннями абсолютної та відносної похибок, які обчислювались згідно виразів (3) і (4):

$$\delta_u(t) = \hat{U}(t) - U_n(t), \quad (3)$$

$$\gamma_t(U_c) = \left| \frac{\hat{T}(U_c) - T_n}{T_n} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

де \hat{U} – оцінка обвідної напруги, $\hat{T}(U_c)$ – оцінка часового інтервалу перенапруги чи провалів напруги, визначена за порогового значення напруги U_c , U_n, T_n – задані параметрами моделі (1).

Результати модельних експериментів

1. Моделювання короткотривалого провалу мережевої напруги

Обвідна сигналу в моделі (1) задається наступним чином:

$$U(t) = \begin{cases} 230 \text{ V}, & t \in [0, 0,055] \text{ s}; \\ 115 \text{ V}, & t \in [0,055, 0,095] \text{ s}; \\ 230 \text{ V}, & t \in [0,095, 0,16] \text{ s}. \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 1, а наведено результати моделювання напруги електромережі із провалом напруги та оцінка обвідної, а на рис. 1, b,c – відповідно графіки похибок $\delta_u(t)$ та похибки $\gamma_t(U_c)$ як функцій часу.

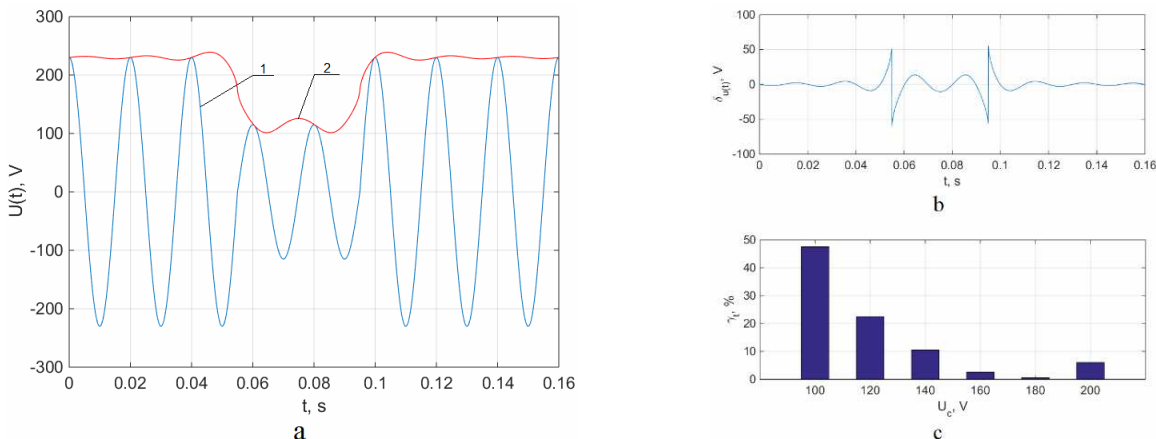


Рис. 1. Результати генерування та обчислення: а – напруги електромережі із провалом та (крива 1) оцінки обвідної (крива 2); b – похибки $\delta_u(t)$; c – похибки $\gamma_t(U_c)$.

З графіка на рис. 1, а видно, що амплітуда сигналу знизилась в 2 рази від номінальної, а тривалість провалу становить 0,04 с. Абсолютна похибка визначення обвідної сигналу на ділянці провалу знаходиться у межах ± 50 В, а відносна похибка визначення тривалості провалу при зміні значень порогової напруги в інтервалі від 160 В до 200 В не перевищує 10 %.

2. Моделювання короткотривалої перенапруги

Обвідна сигналу в моделі (1) задається наступним чином:

$$U(t) = \begin{cases} 230 \text{ V}, & t \in [0, 0,055] \text{ s}; \\ 345 \text{ V}, & t \in [0,055, 0,095] \text{ s}; \\ 230 \text{ V}, & t \in [0,095, 0,16] \text{ s}. \end{cases} \quad (6)$$

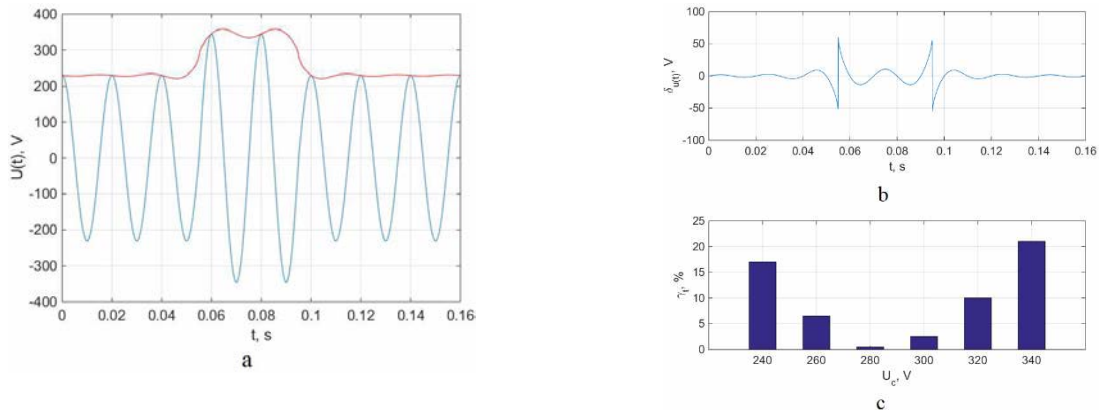


Рис. 2. Результати генерування та обчислення: а – перенапруги в електромережі та (крива 1) оцінки обвідної (крива 2); б – похибки $\delta_u(t)$; с – похибки $\gamma_t(U_c)$.

На рис. 2а наведено результати моделювання електромережі з перенапругою в 1,5 рази більшою за номінальне значення. На рис. 2б,с наведено графіки похибок $\delta_u(t)$ та $\gamma_t(U_c)$, на яких абсолютна похибка оцінки обвідної знаходиться в межах інтервалу ± 50 V, а відносна похибка тривалості перенапруги не більше 2,5% для порогових рівнів від 280 V до 300 V.

Висновки

В роботі розглянуто застосування ДПГ для визначення показників якості напруги амплітудно-часової групи. За результатами модельних експериментів доведено, що ДПГ дає змогу вимірювати як обвідну напруги зі спотвореннями, так і тривалість спотворень напруги у вигляді короткотривалих провалів чи перенапруг, а також короточасних спотворень напруги ВЧ шумом. В проведених експериментах абсолютна похибка визначення амплітуди обвідної становить не більше 50 V, а відносна похибка тривалості інтервалів часу для обраних порогових рівнів не перевищує 10%.

Отримані результати в цілому підтвердили ефективність ДПГ в задачах аналізу амплітудно-часових показників якості напруги і доцільність його використання в системах моніторингу якості електроенергії.

Ключові слова: параметри якості електроенергії, провал напруги, перенапруга, дискретне перетворення Гільберта.

Література

- [1] ДСТУ EN 50160:2023. «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». На заміну EN 50160:2014; чинний від 2014-03-01. Вид. офіц. 2023. 32 с.
- [2] В. В. Лисий, «Комплексна оцінка асиметрії напруги в електричній мережі та методи її усунення», магістерська дисертація: Київ, 2020, 116 с.
- [3] Є. Володарський, А. Волошко, «Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання», *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 3/8 (69), с. 10–17, 2014.
- [4] Vitalii Babak, Artur Zaporozhets, Mykhailo Kulyk, Yurii Kuts, Leonid Scherbak. «Application of discrete Hilbert transform to estimate the characteristics of cyclic signals: information provision», in book, *Systems, Decision and Control in Energy IV*, Springer International Publishing, 2023, p. 93-115.