ЕКОЛОГІЯ СТІЧНИХ ВОД

УДК 504:628.4:621.311
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.36

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЧАСТОТНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТІЧНИХ ВОД ОВОЧЕВОЇ КОНСЕРВАЦІЇ

Себко В.В.[1] (orcid.org/0000-0002-3561-6281)
Босюк А.С.[1] (orcid.org/0000-0001-5254-2272)
Махоніна О.С.[1] (orcid.org/0000-0002-1762-6953)
Нус І.Б.[2] (orcid.org/0009-0002-0166-5648)
[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків
[2]Компанія «Ohmium PEM electrolyzers»
Erika-Mann-Strasse 63, 80636, Muenchen
Vadym.Sebko@khpi.edu.ua, Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua,
Oksana.Makhonina@khpi.edu.ua, igor.nus@ohmium.com

У роботі досліджено безконтактний багатопараметровий електромагнітний метод контролю електрофізичних параметрів стічних вод підприємств з виробництва консервованих огірків та овочевих маринадів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оперативного екологічного моніторингу водних середовищ зі складним іонним складом та змінними фізико-хімічними характеристиками. Запропонований метод базується на частотній стабілізації електромагнітної взаємодії між змінним магнітним полем та вихровими струмами, індукованими у контрольованому рідкому середовищі. Для реалізації методу використано трансформаторний електромагнітний перетворювач, який забезпечує формування первинного магнітного поля та реєстрацію вторинного електромагнітного сигналу. Теоретично обгрунтовано взаємозв'язок між частотою електромагнітного поля, питомою електропровідністю, температурою та параметрами електромагнітної взаємодії. Показано, що автоматична зміна робочої частоти відповідно до зміни електропровідності дозволяє підтримувати стабільний режим електромагнітної взаємодії та зменшувати вплив температурного фактора на результати контролю. Експериментальні дослідження проведено для стічних вод овочевої консервації в діапазоні температур від 12 до 30 ºС із використанням електромагнітного перетворювача радіусом $62 \cdot 10^{-3}$м та початковою частотою f_0 = 20 МГц. В процесі досліджень визначали питому електропровідність, фазовий зсув, температуру, pH та узагальнені параметри електромагнітної взаємодії. Встановлено, що зі зростанням температури питома електропровідність стічних вод збільшується від $8{,}29 \cdot 10^{-1}$ до $11{,}12 \cdot 10^{-1}$ См/м, а фазовий зсув зростає від 6,53 до 8,46º. Одночасно спостерігається поступове зменшення значень pH від 6,90 до 6,52, що характеризує зміну електрохімічного стану контрольованого середовища. Отримані результати підтверджують чутливість інформативних параметрів електромагнітного сигналу до зміни електрофізичних характеристик стічних вод. Запропонований метод забезпечує можливість безконтактного визначення параметрів рідкого середовища без використання електродів, що зменшує вплив поляризаційних та корозійних процесів на результати вимірювань. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для створення автоматизованих систем екологічного моніторингу стічних вод підприємств харчової промисловості. Запропонований підхід може бути використаний для оперативного контролю зміни електрофізичних параметрів водного середовища та оцінювання його стану в умовах виробничого моніторингу. *Ключові слова:* стічні води, овочева консервація, електромагнітний метод, частотна стабілізація, електропровідність, фазовий зсув, екологічний моніторинг, безконтактний контроль.

Application of the frequency stabilisation method of electromagnetic interaction for environmental monitoring of wastewater from vegetable canning. Sebko V., Bosiuk A., Makhonina O., Nus I.

The paper investigates a non-contact multiparametric electromagnetic method for monitoring the electrophysical parameters of wastewater generated by an enterprise producing canned cucumbers and vegetable marinades. The relevance of the study is determined by the need for rapid environmental monitoring of aqueous media characterized by a complex ionic composition and variable physicochemical properties. The proposed method is based on frequency stabilization of the electromagnetic interaction between an alternating magnetic field and eddy currents induced in the controlled liquid medium. A transformer-type electromagnetic transducer is employed to generate the primary magnetic field and record the secondary electromagnetic signal. The relationship between the electromagnetic field frequency, electrical conductivity, temperature, and electromagnetic interaction parameters is theoretically substantiated. It is demonstrated that automatic adjustment of the operating frequency in response to changes in electrical conductivity makes it possible to maintain a stable electromagnetic interaction regime and reduce the influence of temperature on monitoring results.

© Себко В.В., Босюк А.С., Махоніна О.С., Нус І.Б., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Experimental studies were conducted on wastewater from vegetable canning production over a temperature range of 12–30 ºC using an electromagnetic transducer with a working radius of $62 \cdot 10^{-3}$ m and an initial frequency of f_0 = 20 MHz. Electrical conductivity, phase shift, temperature, pH, and generalized electromagnetic interaction parameters were determined during the experiments. It was established that, with increasing temperature, the electrical conductivity of the wastewater increased from $8.29 \cdot 10^{-1}$ to $11.12 \cdot 10^{-1}$ S/m, while the phase shift increased from 6.53 to 8.46º. At the same time, a gradual decrease in pH from 6.90 to 6.52 was observed, indicating changes in the electrochemical state of the controlled medium. The obtained results confirm the sensitivity of the informative parameters of the electromagnetic signal to changes in the electrophysical characteristics of wastewater. The proposed method enables non-contact determination of liquid-medium parameters without the use of electrodes, thereby reducing the influence of polarization and corrosion processes on measurement results. The practical significance of the obtained results lies in the potential application of the frequency stabilization method for electromagnetic interaction in the development of automated environmental monitoring systems for wastewater from food-processing enterprises. The proposed approach can be used for operational monitoring of changes in the electrophysical parameters of aqueous media and assessment of their condition under industrial monitoring conditions. *Key words:* wastewater, vegetable canning, electromagnetic method, frequency stabilization, electrical conductivity, phase shift, environmental monitoring, non-contact monitoring.

Постановка проблеми. Стічні води підприємств овочевої консервації, зокрема підприємств з виробництва консервованих огірків та овочевих маринадів, характеризуються значним вмістом органічних домішок, солей, залишків овочевої сировини та технологічних реагентів. Зміна технологічних режимів виробництва, складу сировини та кількості використаних технологічних реагентів зумовлює відповідну варіацію електропровідності, фазових характеристик електромагнітного сигналу та інших параметрів взаємодії контрольованого середовища з електромагнітним полем. Традиційні контактні методи вимірювання мають ряд недоліків, пов'язаних із поляризацією електродів, корозією чутливих елементів та нестабільністю вимірювань у забруднених середовищах. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання безконтактних електромагнітних методів контролю. Це створює передумови для використання електромагнітних характеристик як інформативних ознак під час оперативного оцінювання стану стічних вод. Під час взаємодії змінного магнітного поля з електропровідним рідким середовищем у ньому індукуються вихрові струми. Їх інтенсивність і просторовий розподіл залежать насамперед від питомої електропровідності середовища та частоти збуджувального поля. Зі зміною електропровідності змінюється характер електромагнітного навантаження перетворювача, що проявляється у зміні амплітуди та фазового співвідношення первинного і вторинного сигналів. Таким чином, параметри вторинного електромагнітного сигналу можуть використовуватися для непрямого визначення характеристик контрольованого рідкого середовища.

Важливим фактором, який необхідно враховувати під час електромагнітного контролю стічних вод, є температура. Підвищення температури призводить до зміни рухливості іонів та, відповідно, питомої електропровідності розчину. Якщо робоча частота вимірювальної системи залишається незмінною, температурні зміни можуть спричиняти додаткову варіацію параметрів електромагнітного сигналу та погіршувати достовірність контролю. Тому, для забезпечення стабільності вимірювального режиму доцільним є автоматичне коригування частоти збуджувального сигналу відповідно до зміни електропровідності контрольованого середовища. Застосування принципу частотної стабілізації дозволяє підтримувати близький до сталого режим електромагнітної взаємодії перетворювача зі стічними водами при зміні їх електрофізичних характеристик. У такому випадку частота електромагнітного поля розглядається не лише як параметр збудження, а і як керована інформаційна величина, пов'язана зі зміною електропровідності середовища. Це створює можливість зменшити вплив температурного фактора та підвищити стабільність визначення інших інформативних характеристик.

Додатковим джерелом інформації про стан стічних вод є фазовий зсув між первинним і вторинним електромагнітними сигналами. Його зміна пов'язана з перерозподілом активної та реактивної складових електромагнітної взаємодії та може відображати зміни електропровідності й температури контрольованого середовища. Одночасне використання електропровідності, фазового зсуву, температури, pH та узагальненого параметра електромагнітної взаємодії формує багатопараметрову інформаційну систему контролю. Особливістю безконтактного підходу є відсутність безпосереднього контакту вимірювальних елементів із досліджуваною рідиною. Це є суттєвою перевагою під час роботи зі стічними водами, оскільки зменшується вплив поляризації та корозії електродів, а також пов'язаних із ними змін контактного опору. Внаслідок цього електромагнітний метод може бути адаптований для тривалого автоматизованого контролю параметрів стічних вод у виробничих умовах.

Отже, поєднання безконтактного електромагнітного перетворення та частотної стабілізації режиму взаємодії створює теоретичну основу для оперативного багатопараметрового екологічного моніторингу стічних вод овочевої консервації. При цьому зміна частоти, електропровідності та фазових характеристик може розглядатися як взаємопов'язаний комплекс інформаційних ознак, на основі якого здійснюється оцінювання поточного стану контрольованого середовища.

Актуальність дослідження. Стічні води підприємств овочевої консервації характеризуються змінним іонним складом, наявністю органічних та мінеральних компонентів, а також значною залежністю електрофізичних характеристик від температури t. Такі особливості ускладнюють оперативний контроль стану водного середовища, оскільки зміна температури та концентрації іонів одночасно впливає на електропровідність χ, фазові характеристики та інші параметри електромагнітної взаємодії. У зв'язку з цим актуальним є створення методів контролю, здатних забезпечувати стабільні вимірювальні умови при зміні фізико-хімічного стану стічних вод. Особливого значення набуває використання безконтактних електромагнітних методів, які не потребують безпосереднього контакту чутливих елементів із досліджуваною рідиною. На відміну від контактних електродних засобів, такий підхід дозволяє зменшити вплив поляризаційних і корозійних процесів та створює передумови для тривалої роботи вимірювальних систем у складних водних середовищах. Додатковою перевагою є можливість використання одного перетворювача для отримання інформації про декілька параметрів контрольованого середовища.

Науковий інтерес становить застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії, за якого робоча частота f змінюється відповідно до зміни питомої електропровідності χ стічних вод. Підтримання сталого узагальненого параметра електромагнітної взаємодії дає можливість компенсувати вплив зміни електрофізичного стану середовища та забезпечити більш стабільний режим вимірювань. При цьому аналіз сукупності питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, температури t, pH та узагальненого параметра Q_t розширює інформаційну основу оцінювання стану стічних вод.

Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є удосконалення безконтактного багатопараметрового контролю стічних вод підприємств овочевої консервації шляхом стабілізації електромагнітної взаємодії та адаптивного керування робочою частотою вимірювальної системи. Розв'язання цієї проблеми створює основу для підвищення інформативності та стабільності оперативного екологічного моніторингу. Застосування питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, температури t, pH та узагальненого параметра Q_t як взаємопов'язаних інформативних характеристик дозволяє сформувати комплексний підхід до оцінювання електрофізичного стану стічних вод. Це створює передумови для подальшої розробки автоматизованих систем безконтактного екологічного моніторингу стічних вод підприємств харчової промисловості.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Запропонований авторами метод частотної стабілізації електромагнітної взаємодії безпосередньо пов'язаний із сучасними науковими та прикладними завданнями у сфері екологічного моніторингу стічних вод підприємств овочевої консервації. Авторський підхід ґрунтується на використанні трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП), який забезпечує безконтактну взаємодію змінного магнітного поля з контрольованим рідким середовищем та формування інформативного вторинного електромагнітного сигналу. Це дозволяє здійснювати контроль електрофізичних характеристик стічних вод без безпосереднього контакту вимірювальних елементів із рідиною. Наукова складова авторського доробку полягає у встановленні взаємозв'язку між питомою електропровідністю χ, фазовим зсувом φ, температурою t, pH та узагальненим параметром електромагнітної взаємодії Qt. Застосування частотної стабілізації дозволяє адаптувати робочий режим вимірювальної системи до зміни χ контрольованого середовища та підтримувати стабільні умови електромагнітної взаємодії. Запропонована калібрувальна емпірична залежність для pH розширює можливості комплексної інтерпретації результатів електромагнітного контролю саме для досліджуваних стічних вод овочевої консервації. Практична значущість отриманого доробку полягає у формуванні основи для створення автоматизованих засобів оперативного безконтактного екологічного моніторингу. Використання сукупності взаємопов'язаних інформативних параметрів дозволяє підвищити інформативність контролю та своєчасно виявляти зміни електрофізичного стану стічних вод. Запропонований підхід може бути адаптований до виробничих систем моніторингу підприємств харчової промисловості, де важливими є безперервність, оперативність та стабільність контролю параметрів водного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері контролю фізико-хімічних параметрів водних і рідинних середовищ значною мірою пов'язані із застосуванням електричних методів вимірювання. Зокрема, кондуктометричні підходи використовуються для оперативного визначення питомої електропровідності χ та оцінювання зміни електричних властивостей досліджуваних середовищ [1–4]. Показано, що використання електричних характеристик може бути ефективним інструментом експрес-контролю якості рідинних середовищ, а вдосконалення конструкції вимірювальних перетворювачів дозволяє підвищувати стабільність та інформативність отриманих результатів [1, 2]. Важливим напрямом досліджень є удосконалення кондуктометричних методів контролю для середовищ зі складним фізико-хімічним складом. Інваріантні кондуктометричні вимірювальні перетворювачі розглядаються як засіб підвищення достовірності визначення χ за умов впливу різних дестабілізуючих факторів [2]. Кондуктометричний контроль також застосовується для оцінювання яко-

сті води, зокрема під час визначення її електричних характеристик та контролю відповідності встановленим вимогам [3]. Комплексне використання кондуктометрії, потенціометрії та рефрактометрії розглядається як перспективний підхід до експрес-контролю водних середовищ і дозволяє отримувати додаткову інформацію про їх фізико-хімічний стан [4].

Окремий напрям становлять дослідження впливу електромагнітних факторів на властивості водних середовищ. В роботах [5, 6] розглянуто взаємодію води та електромагнітного випромінювання, а також біологічні ефекти електромагнітного впливу. Зазначені дослідження підтверджують складний характер взаємодії електромагнітного поля з водними та біологічними середовищами, що створює наукові передумови для подальшого використання електромагнітних характеристик як інформаційних параметрів під час контролю рідинних середовищ. Значна увага приділяється також розвитку безконтактних та вихрострумових вимірювальних перетворювачів. Застосування накладних перетворювачів у вихрострумовому контролі дозволяє реалізувати вимірювання без безпосереднього контакту чутливого елемента з об'єктом контролю [7, 9]. Такий принцип є особливо перспективним для дослідження агресивних, забруднених або хімічно нестабільних рідин, оскільки відсутність прямого контакту потенційно зменшує вплив поляризаційних та корозійних процесів на результати вимірювань. Для підвищення інформативності контролю важливим є також використання фазових характеристик електромагнітних сигналів, що розглядаються у фазовимірювальних системах неруйнівного контролю [8].

Окремий інтерес становлять багатопараметрові електромагнітні методи контролю стічних вод підприємств овочевої консервації. У роботі [10] запропоновано багатопараметровий підхід до визначення параметрів стічних вод таких підприємств із використанням електромагнітної взаємодії. Це підтверджує перспективність використання електромагнітних характеристик для комплексного оцінювання стану стічних вод із урахуванням особливостей їх багатокомпонентного складу. Разом із тим аналіз наведених досліджень показує, що основна увага у відомих роботах приділяється визначенню χ, потенціометричних характеристик або окремих параметрів електромагнітної взаємодії. Недостатньо розкритим залишається питання застосування частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для безконтактного комплексного контролю стічних вод овочевої консервації при зміні їх температури t та електропровідності χ. Тому, перспективним напрямом є поєднання інформації про питому електропровідність χ, фазовий зсув φ, температуру t, pH та узагальнений параметр електромагнітної взаємодії Q_t в межах єдиного вимірювального підходу.

Таким чином, результати попередніх досліджень створюють теоретичне та експериментальне підґрунтя для розвитку безконтактних електромагнітних методів екологічного моніторингу. Водночас необхідність підвищення стабільності вимірювань при температурних змінах та забезпечення одночасного контролю декількох інформативних характеристик обґрунтовує доцільність подальшого дослідження методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для стічних вод підприємств овочевої консервації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Незважаючи на наявність досліджень у сфері електромагнітного та кондуктометричного контролю рідинних середовищ, недостатньо опрацьованим залишається питання безконтактного багатопараметрового контролю стічних вод підприємств овочевої консервації за умов одночасної зміни їх температури t, електропровідності χ та кислотно-лужних характеристик. Зокрема, потребує подальшого дослідження можливість використання параметрів вторинного електромагнітного сигналу для комплексного оцінювання стану стічних вод без застосування контактних електродів. Окремою невирішеною проблемою є забезпечення стабільності електромагнітної взаємодії при зміні температури t досліджуваного середовища. Зі зміною температури змінюється χ, що безпосередньо впливає на характер вихрових струмів та параметри вторинного електромагнітного сигналу. Тому використання сталої робочої частоти f може призводити до зміни умов електромагнітної взаємодії та, відповідно, до додаткової похибки контролю.

Також, недостатньо дослідженим залишається застосування автоматичної зміни частоти як засобу стабілізації узагальненого параметра електромагнітної взаємодії Q_t. Ще одним невирішеним аспектом є встановлення взаємозв'язку між узагальненим параметром електромагнітної взаємодії та водневим показником pH стічних вод. Для багатокомпонентних стічних вод овочевої консервації така залежність може мати специфічний характер і потребує експериментального калібрування. У зв'язку з цим актуальним є визначення емпіричної залежності, яка дозволяє використовувати зміну Q_t як додаткову інформаційну ознаку для оцінювання pH саме досліджуваного типу стічних вод.

Таким чином, потребує подальшого розвитку методика комплексного безконтактного контролю, яка поєднує інформацію про питому електропровідність χ, фазовий зсув φ, температуру t, pH та узагальнений параметр Q_t. Вирішення зазначених питань дозволить підвищити інформативність електромагнітного контролю та створити передумови для практичного застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії в автоматизованих системах оперативного екологічного моніторингу стічних вод підприємств овочевої консервації.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності екологічного моніторингу стічних вод овочевої консервації шляхом застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії.

1. Дослідити закономірності електромагнітної взаємодії трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) зі стічними водами овочевої консервації та встановити взаємозв'язок між питомою електропровідністю χ, температурою t, фазовим зсувом φ і узагальненим параметром Q_t.

2. Розробити та обґрунтувати метод частотної стабілізації електромагнітної взаємодії, який забезпечує підтримання сталого режиму вимірювального контролю при зміні t та χ стічних вод.

3. Отримати результати безконтактних вимірювань питомої електропровідності χ, температури t і pH зразка стічних вод

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у розробленні та теоретичному обґрунтуванні методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для безконтактного багатопараметрового контролю стічних вод овочевої консервації. Запропоновано принцип автоматичної зміни робочої частоти електромагнітного поля відповідно до зміни χ та t контрольованого середовища, що забезпечує підтримання сталого режиму електромагнітної взаємодії ТЕП зі зразком стічних вод. Запропоновано калібрувальну емпіричну залежність для оцінювання pH за зміною узагальненого параметра Q_t, коефіцієнт якої визначається експериментально для конкретного складу стічних вод овочевої консервації.

Загальнонаукове значення. Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості подальшої адаптації запропонованого методу до автоматизованих систем оперативного екологічного моніторингу на підприємствах харчової промисловості. Запропонований підхід може бути використаний для безперервного контролю зміни електрофізичних параметрів стічних вод без безпосереднього контакту вимірювального перетворювача з контрольованим середовищем. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення технічних засобів контролю параметрів стічних вод. Метод може бути інтегрований до складу автоматизованих вимірювальних комплексів для оперативного отримання інформації про стан контрольованого середовища. Використання запропонованого підходу створює передумови для підвищення оперативності контролю та своєчасного виявлення змін фізико-хімічних характеристик стічних вод.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямом подальших досліджень є перевірка запропонованого підходу для різних складів стічних вод, розширення діапазону контрольованих параметрів та оцінювання стабільності методу в умовах тривалого виробничого моніторингу. Окрему увагу доцільно приділити встановленню закономірностей впливу концентрації іонів та температури на інформативні характеристики електромагнітного сигналу. Перспективним є також удосконалення алгоритму автоматичної зміни робочої частоти з урахуванням одночасної зміни χ, фазового зсуву φ та pH контрольованого середовища. Важливим напрямом є експериментальне визначення калібрувальних коефіцієнтів для різних типів стічних вод та оцінювання відтворюваності отриманих результатів. Впровадження методу створює можливість оперативного виявлення змін стану стічних вод та своєчасного коригування режимів їх очищення.

Методика експерименту. Експериментальні дослідження виконували на лабораторних зразках стічних вод підприємства з виробництва консервованих огірків та овочевих маринадів, попередньо усереднених та профільтрованих від крупнодисперсних включень. Вимірювання питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, pH та температури t здійснювали за допомогою трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) із радіусом робочої зони $a = 62 \cdot 10^{-3}$ м. Початкова частота збудження становила $f_0 = 20$ МГц, а струм у збуджувальній обмотці підтримували на рівні $I = 50$ мА. Температуру контрольованих зразків змінювали в інтервалі $t = 12–30$ ºС із використанням нагрівального модуля. Вимірювання проводили при послідовному підвищенні температури зразка з реєстрацією значень χ, φ та pH та узагальненого параметра електромагнітної взаємодії Q. Для врахування температурної залежності χ використовували температурний коефіцієнт $\alpha = 1{,}78 \cdot 10^{-2}$ 1/ºС. На початковому етапі досліджень встановлювали температуру t = 12 ºС та початкову частоту 20 МГц, після чого зі зміною t та χ контрольованого середовища здійснювали відповідне коригування робочої частоти відповідно до принципу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії. Отримані результати використовували для встановлення закономірностей зміни фізико-хімічних параметрів стічних вод у досліджуваному діапазоні температур.

Результати та обговорення. Результати досліджень підтвердили наявність закономірної зміни фізико-хімічних характеристик стічних вод овочевої консервації під впливом температурного фактора. Встановлено, що підвищення температури контрольованого середовища супроводжується монотонним зростанням питомої електропровідності χ, що зумовлено зміною рухливості іонів у досліджуваному середовищі. Отримана залежність свідчить про виражену температурну чутливість електричних властивостей стічних вод та підтверджує можливість використання безконтактного електромагнітного перетворювача для їх оперативного контролю. На рис. 1 наведено схему установки для реалізації методу вимірювального контролю зразка стічних вод. До складу вимірювальної установки входять: генератор змінного сигналу Г, блок регулювання час-

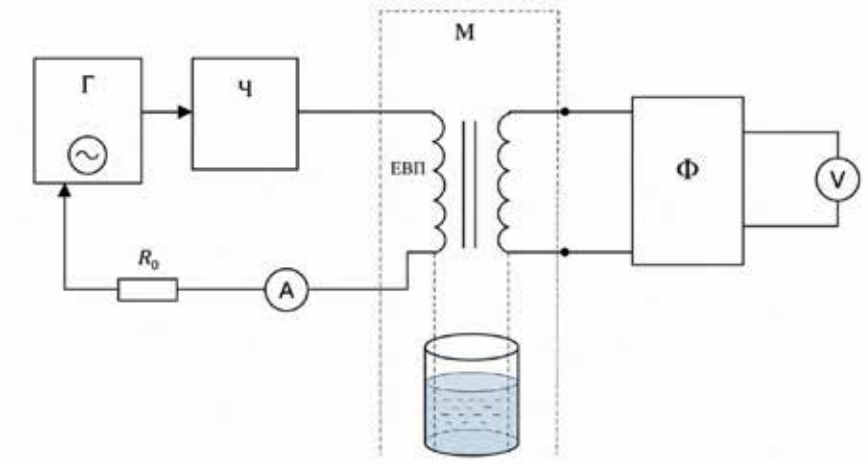


Рис. 1. Схема вимірювального контролю фізико-хімічних параметрів зразка стічних вод

тоти Ч, трансформаторний електромагнітний перетворювач (ТЕП), на схемі позначено буквою М, еталонний опір R_0, амперметр А, збуджувальна обмотка ЕВП, фазочутливий блок Ф та вольтметр V для вимірювання сумарної ЕРС E_Σ.

Принцип роботи установки полягає у формуванні високочастотного змінного магнітного поля, яке створюється генератором – Г та подається на – М. Під дією змінного магнітного поля у досліджуваному середовищі виникають вихрові струми, параметри яких залежать від електропровідності χ, температури t та pH у стічних водах овочевої консервації.

Еталонний опір R_0 та амперметр А забезпечують стабілізацію і контроль струму в колі збудження. Вторинний сигнал, який формується у вимірювальній обмотці ЕВП під дією електромагнітної взаємодії, надходить до фазочутливого блока Ф. За допомогою блока Ф визначається фазовий зсув між первинним та вторинним сигналами. Вольтметр V використовується для вимірювання ЕРС E_Σ, величина якої змінюється залежно від електрофізичних параметрів контрольованого середовища.

Особливістю запропонованого методу є стабілізація частоти електромагнітної взаємодії f при зміні параметрів стічних вод. Це дозволяє підтримувати сталий режим роботи вимірювальної системи та підвищувати точність безконтактного контролю.

Теоретичні основи методу. Запропонований метод базується на підтриманні сталого режиму електромагнітної взаємодії між змінним магнітним полем та електропровідним рідким середовищем.

Узагальнений параметр електромагнітної взаємодії визначається як:

$$Q_t = Q_0 = const \qquad (1)$$

де: Qt – узагальнений параметр при поточній температурі; Q0 – початкове значення параметра.

Для безконтактного електромагнітного контролю використовується узагальнений параметр взаємодії [5–8]:

$$Q_t = a\sqrt{\mu_0 \chi_t \omega} \qquad (2)$$

де: a – радіус контрольованого середовища; μ0 – магнітна стала; χt – питома електропровідність з урахуванням температури; ω = 2πf – кутова частота.

За умови стабілізації параметра Q_t отримуємо:

$$a\sqrt{\mu_0 \chi_0 \omega_0} = a\sqrt{\mu_0 \chi_t \omega_t} \qquad (3)$$

Після перетворення маємо:

$$\chi_0 \omega_0 = \chi_t \omega_t \qquad (4)$$

або:

$$\chi_0 f_0 = \chi_t f_t \qquad (5)$$

Звідси визначається поточна частота f_t:

$$f_t = f_0 \frac{\chi_0}{\chi_t} \qquad (6)$$

Таким чином, при зміні питомої електропровідності χ автоматично змінюється робоча частота системи f, що забезпечує стабільність електромагнітної взаємодії.

Температурна залежність χ визначається співвідношенням [7]:

$$\chi_t = \chi_0 \left[1 + \alpha\left(t - t_0\right)\right] \qquad (7)$$

де: α – температурний коефіцієнт електропровідності; t0 – початкова температура; t – поточна температура.

Підставляючи цей вираз у формулу частоти (6), отримаємо:

$$f_t = \frac{f_0}{1 + \alpha\left(t - t_0\right)} \qquad (8)$$

Отримане рівняння показує, що зі збільшенням t робоча частота системи f зменшується, що забезпечує стабілізацію електромагнітної взаємодії у контрольованому середовищі.

Фазовий зсув між первинним та вторинним сигналами визначається виразом:

$$\varphi_t = \arctan\left(\frac{R}{\omega L}\right) \quad (9)$$

де: L – еквівалентна індуктивність; R – активний опір контрольованого середовища.

Оскільки опір середовища залежить від χ:

$$R \sim \frac{1}{\chi_t} \quad (10)$$

то при збільшенні t та зростанні χ фазовий зсув φ також збільшується.

Узагальнений водневий показник *pH* розраховують за наступною формулою:

$$pH_t = pH_0 - k_{pH}(Q_t - Q_0) \quad (11)$$

де pHt – поточне значення водневого показника; pH0 – його початкове значення; Qt – поточне значення узагальненого параметра електромагнітної взаємодії; Q0 – початкове значення узагальненого параметра; kpH – емпіричний коефіцієнт чутливості pH до зміни Qt.

За результатами апроксимації експериментальних даних для досліджуваних стічних вод прийнято $k_{pH} = 2{,}29$. Запропонована залежність є калібрувальною емпіричною залежністю, встановленою для досліджуваного складу стічних вод овочевої консервації, і не розглядається як універсальна залежність для визначення pH (формула 11). Для стічних вод іншого складу значення коефіцієнта k_{pH} має визначатися експериментально.

У табл. 1 наведено результати визначення електричних та температурних параметрів зразка стічних вод у діапазоні зміни загальної концентрації іонів.

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням температури спостерігається зростання питомої електропровідності χ_t та узагальненого параметра Q_t. Одночасно фазовий зсув φ_t також збільшується, що пов'язано зі зміною рухливості іонів та характеру електромагнітної взаємодії у контрольованому середовищі. Значення pH при цьому поступово зменшується, що свідчить про зміну іонного складу стічних вод при нагріванні. Отримані результати підтверджують ефективність використання методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для безконтактного контролю фізико-хімічних параметрів стічних вод овочевої консервації.

Висновки. Проведені дослідження показали, що електромагнітна взаємодія трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) зі стічними водами овочевої консервації є достатньо чутливою до зміни параметрів контрольованого середовища, що створює можливість використання інформативних характеристик вторинного сигналу. Встановлено, що запропонований принцип частотної стабілізації дає змогу компенсувати зміну електрофізичного стану середовища шляхом коригування робочого режиму вимірювальної системи. Такий підхід забезпечує більш сталі умови вимірювального контролю при зміні температури t та електропровідності χ. Експериментально підтверджено закономірне підвищення χ стічних вод зі зростанням t. У дослідженому діапазоні температур значення χ_t збільшилося від $8{,}29 \cdot 10^{-1}$ до $11{,}12 \cdot 10^{-1}$ См/м, що характеризує істотну залежність електричних властивостей середовища від температурного режиму. Виявлено відповідну зміну фазової характеристики електромагнітного сигналу: при підвищенні t приблизно від 12 до 30 ºС фазовий зсув збільшився від 6,53 до 8,46º. Це підтверджує можливість використання фазових параметрів як додаткових інформативних ознак під час оцінювання стану водного середовища. За результатами вимірювань встановлено поступове зниження pH від 6,90 до 6,52 при підвищенні t. Зміна цього показника разом із динамікою χ та φ, свідчить про комплексний характер електрофізичних перетворень у досліджуваному середовищі. Отримані значення узагальненого параметра Q_t, демонструють його зростання в усьому дослідженому температурному інтервалі. Це дозволяє розглядати узагальнений електромагнітний параметр Q_t, як додатковий

Таблиця 1

Результати визначення електричних та температурних параметрів зразка стічних вод: α = 1,78·10⁻² 1/ºС; t_0 = 12ºС; *a* = 62·10⁻³м; t = [12 … 30 ºС], I = 50 мА; f = 20 МГц

t, ºС	$\chi_t \cdot 10^{-1}$, См/м	φ_t, град	pH	Q_t
12,04	8,29	6,5286	6,90	0,9600
15,01	8,61	6,7964	6,74	0,9771
16,98	8,92	6,9734	6,71	0,9929
19,01	9,24	7,1899	6,69	1,0086
20,99	9,55	7,4035	6,67	1,0241
23,02	9,86	7,6182	6,63	1,0403
24,98	10,21	7,8304	6,60	1,0542
27,01	10,49	8,0491	6,58	1,0691
29,01	10,81	8,2538	6,55	1,0830
30,09	11,12	8,4608	6,52	1,0972

показник для комплексної характеристики змін електричних властивостей стічних вод. Відсутність безпосереднього контакту чутливих елементів із досліджуваною рідиною є важливою перевагою запропонованого підходу порівняно з контактними електродними методами. Це зменшує потенційний вплив поляризації та корозії електродів і створює передумови для тривалої роботи засобів контролю у складних водних середовищах. Сукупний аналіз питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, температури t, pH та узагальненого параметра Q_t, показує доцільність багатопараметрового підходу до оцінювання стану стічних вод. У свою чергу, використання декількох взаємопов'язаних характеристик підвищує інформативність контролю та розширює можливості інтерпретації результатів вимірювань.

Література

1. Мідик І.М., Лиса О.В. Оперативний контроль якості овочів за електричними характеристиками. *Вимірювальна техніка та метрологія.* 2018. Вип. 79. № 4. С. 17–24.
2. Походило Є. В., Плахтій Н. Л., Мартинович Н. В. Інваріантні кондуктометричні вимірювальні перетворювачі. Національний університет «Львівська політехніка». *Вимірювальна техніка та метрологія.* Львів. 2010. С. 83–87.
3. Брицун В.М., Останіна Н.В. Особливості кондуктометричного контролю якості дистильованої води для фармакопейних потреб. *Фармакологія та лікарська токсикологія.* 2018. № 2 (58). С. 97–103.
4. Кофанова О.В., Борисов О.О. Потенціометрія, кондуктометрія і рефрактометрія як методи експрес-контролю якості ґрунтів і поверхневих вод у зонах відпочинку людей. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2019. Т. 1, № 9. С. 1–18.
5. Савченко В.В., Синявський О.Ю., Бунько В.Я. Вплив магнітного поля на воду. *Енергетика і автоматика.* 2019. № 1. С. 6–15.
6. Баран Б.А., Бубенщикова Г.Т., Хрящевський В.М. Біологічна дія електромагнітного випромінювання. *Довкілля та здоров'я.* 2009. № 4. С. 43–46.
7. Кучерук В.Ю. Фотоелектричний вимірювальний перетворювач параметрів потоку молока. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* 2017. № 1. С. 66–71.
8. Маєвський С.М. Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 288 с.
9. Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.* 2016. Вип. 51. С. 58–63.
10. Себко В.В., Нус І.Б., Новожилова Т.Б. Багатопараметровий метод контролю параметрів стічних вод підприємств овочевої консервації. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2025. Вип. 146, ч. 2. С. 233–242.

Дата першого надходження статті до видання: 28.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026