

Смердов А.А., доктор технічних наук, професор
Полтавська державна аграрна академія

Соколов С.Є., старший викладач,
Смердова Т.А., кандидат технічних наук
Національний університет "Львівська політехніка"

ВИКОРИСТАННЯ ПАСИВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ (ОГЛЯД)

Рецензент – доктор сільськогосподарських наук, професор А.А. Поліщук

Наведені приклади використання вимірювання пасивних електричних параметрів (електричного опору, ємності, імпедансу, діелектричної проникливості) у сільському господарстві. Зроблено аналіз отриманих у різних дослідженнях результатів. Показано перспективність використання визначення пасивних електричних параметрів для інструментальної об'єктивної оцінки якості сільськогосподарських продуктів та вивчення стану фізіологічних характеристик сільськогосподарських тварин і рослин у експерименті й на практиці.

Ключові слова: біоелектроімпедансометрія, біодіелектрометрія, якість продуктів, фізіологічні характеристики у сільськогосподарських тварин.

Постановка проблеми. Проблема якості продуктів сільськогосподарської діяльності та діагностика стану тварин і рослин завжди актуальна. На сучасному етапі розвитку сільського господарства все більшу роль відіграє застосування об'єктивних, інструментальних методів дослідження. Визначення пасивних електричних параметрів (ПЕП) із метою діагностики в останні десятиліття займає значне місце у цьому переліку [2, 21, 35]. Це насамперед: електропровідність (ЕП), яка є коефіцієнтом пропорційності між силою струму та різницею потенціалів у законі Ома; електричний опір (ЕО) – значення, обернене електропровідності; питома електропровідність (питома ЕП) і питомий електричний опір (питомий ЕО), які пов'язані з геометрією електродів та біооб'єкта; електрична ємність (ЕЄ), яка пов'язує електричний потенціал провідника з його електричним зарядом; біоелектроімпеданс (БЕІ) – повний опір, який враховує, що біологічна тканина має як електричний опір, так і електричну ємність; діелектрична проникливість (ДП) – коефіцієнт, що характеризує середовище між двома взаємодіючими електричними зарядами. Однак як розробникам, так і користувачам не вистачає узагальнюючої інформації про сучас-

ний стан біотехнічних систем сільськогосподарського призначення, що використовують ПЕП, а також аналізу їх недоліків, проблем і перспектив.

Аналіз основних досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. ПЕП більше ста років використовується для вирішення різних задач у біології та медицині, в тому числі у практиці сільського господарства [1, 2]. Однак оглядові публікації по даній тематичі стосуються або одного типу біологічних об'єктів [7, 11, 32], або переліку електричних властивостей біологічних тканин [23].

Мета і завдання досліджень – на конкретних прикладах показати імовірні напрями розвитку використання визначення ПЕП біологічних тканин у сільському господарстві з аналізом проблем та перспектив ПЕП.

Матеріали та методи досліджень. Матеріалом (предметом) досліджень є опубліковані дані про досвід використання визначення ПЕП біологічних тканин у практиці сільського господарства. Методом дослідження служить аналіз науково-методичної літератури у розрізі досліджуваної проблеми.

Результати досліджень. Використання ПЕП можна поділити на методики, що дають змогу контролювати якість сільгосппродуктів, і методики, які дають можливість оцінки стану важливих фізіологічних характеристик тварин та рослин.

Оцінка якості.

Роботами Тарусова [31], Thomasset [41, 42] та інших було доведено, що відношення значень біоелектричного імпедансу, що вимірюється на низькій (≤ 10 кГц) та високій (≥ 100 кГц) частотах змінного струму, дають цінну інформацію про стан біологічної тканини.

У роботі Ж. Шарпаньє зі співавторами [38] розглянуто відношення електричного імпедансу, що вимірювали на частотах 1 кГц (Z_1) та 100 кГц

(Z_{100}) синусоїдального струму у зв'язку з терміном збереження м'яса. Експерименти проводилися за допомогою приладу Thomasset [42]. Було експериментально показано, що значення

відношення $\frac{Z_1}{Z_{100}}$ через добу після забою розташовуються між 2 та 5, у залежності від

орієнтації електродів по відношенню до м'язових волокон. Після десяти днів зберігання при

+6°C значення $\frac{Z_1}{Z_{100}}$ падало в усіх пробах приблизно на 50%.

При заморожуванні м'яса відразу після забою на розморожуванні через тридцять днів

$\frac{Z_1}{Z_{100}}$ складало не більше 1,24% (в середньому 1,13).

У роботі зроблені висновки, що зниження відношення низько- та високочастотного імпедансів відбувається завдяки зменшенню повного опору на низькій частоті внаслідок структурних змін, що приводять до змін ємкісної дії біологічних мембран.

Наступні дослідження [19, 37] підтвердили результати та розширили перспективи використання ЕО для вивчення якості сільськогосподарської продукції.

Було показано можливості моніторингу якості продуктів харчування за допомогою портативних електроімпедансометрів. Розроблені та впроваджені спеціалізовані технічні засоби контролю картоплі, озимих зернових культур, фруктів [14]. Наведені експериментальні дані давали високу ефективність експрес-аналізу стану картоплі у періоди спокою та активізації [19]. Відібрані за допомогою індикатора "Тигран-ДИ" насінні картоплини показали підвищення врожайності в 4-5 разів.

Вчені з Німеччини [40] довели можливість використовувати значення електричного імпедансу для об'єктивної оцінки якості овочів, фруктів та риби. З цією метою автори запропонували прилад для потреб сільського господарства, який отримав високу оцінку на Лейпцігській ярмарці. Розробники запропонували використовувати замість двохчастотного вимірювача електроімпедансу короткий електричний імпульс, що спростило прилад і зменшило похибку вимірювання.

Індикатор "Тигран-ДИ" (та його попередня модифікація "Тигран-Д") дозволяє також визначати ступінь обмороженості саджанців фруктових і декоративних дерев, виноградної лози. Ця функція, що закладена у роботу пристрою, базується на даних багаторічних досліджень попередників [12, 15, 16, 22, 24].

Osterhant, 1922; Luyet, 1932 [цит. за 36] пока-

зали, що загибель клітин і тканин супроводжується різким зменшенням їх низькочастотного опору. Цей факт покладений в основу використання вимірювача електричного опору для визначення пошкодження й загибелі рослин від різних причин, в першу чергу, під дією холоду [36]. Дослідження проводилися за допомогою серійних вимірювальних мостів (ТМ-351, УМ-3) голчатими сталевими й нікелевими електродами на частоті 1,0 кГц синусоїдального струму. Дані, що отримані на озимих пшениці, житу та виноградній лозі, показали значну кількісну різницю (до 50%) між рослинами різного рівня стійкості до впливу холоду. Крім того, у роботі [2] наведені дані, що демонструють можливість за допомогою вимірювання ЕО оцінювати вплив на рослини високої температури та недостатності води (засухостійкості). Отримані таким чином дані можуть лягти в основу оцінки та вибору нових гібридів, які служать вихідним матеріалом у створенні господарських сортів рослин.

Діелектричну постійну широко використовують для визначення вологості сипких матеріалів і деревини [5-7]. Методики вимірювання базуються на значній залежності ВП від кількості води у зерні, зернобобових, кукурудзі. Визначення ЕС конденсатора в якості діелектрика, між пластинами якого розташовують зерно, дає можливість розрахувати кількість води. Вода у біоматеріалах знаходиться у вільній та зв'язаній формах, фізичні властивості яких суттєво відрізняються. Біодіелектричний метод при проведенні аналізу з різною температурою зразка дозволяє роздільне вимірювання вільної та зв'язаної води. На цьому принципі побудовано прилад для неруйнуючого контролю вологи. Абсолютна похибка, що наведена авторами, не перевищує 0,5% [17].

У львівському НВК "Мотом" розроблений і випускається вимірювач вологості зерна "Дніпро-3" [8]. При діапазонах вимірювання:

- для зернових культур 6-40%;
- для зернобобових та кукурудзи 6-40%;
- для продуктів переробки 9-16%,

допустимі значення абсолютної похибки вимірювання

- в діапазоні вимірювання 8-17% $\pm 1,0\%$;
- в діапазоні вимірювання 17-35% $\pm 1,5\%$;
- в діапазоні вимірювання 35-40% $\pm 2,5\%$.

Тривалість вимірювання не більше трьох хвилин. Прилад забезпечений методикою перевірки. Він може використовуватися на елеваторах, заготівельних підприємствах, млинах, великих хліборобних підприємствах під час заготівлі,

збирання та зберігання зерна пшениці, ячменю, жита, гречки, проса, вівса, кукурудзи, гороху, соняшника, ріпаку, сої.

Перспективним методом вимірювання вологості сільськогосподарських продуктів автори [27] називають НВЧ – надвисокочастотну вологометрію. Функціональна схема приладу складається з послідовно з'єднаних генератора НВЧ, випромінювача НВЧ, вимірювальної камери, до якої закладають досліджуваний матеріал, приймача й тракту перетворення сигналу, що пройшов крізь вимірювальну камеру. Прилад працює на частоті 10 ГГц – оптимальній для зерна хлібних культур. Вологість розраховується за значеннями згасання потужності НВЧ-сигналу при проходженні крізь біомасу. Автори дають розрахунок похибки вимірювання, яка становить < 1,0% [28].

Оскільки вологість істотно впливає на режими зберігання та переробки зерна, визначає його вартість і масу при заготовках, використання біодіелектрометрії дає вкрай важливу інформацію як для виробника, так і для користувача.

Кондуктометрію, точніше, вимірювання питомої ЕП, використовують для визначення вмісту золи у цукрі [18]. На цьому принципі побудований лабораторний кондуктометр-золомер КЛЗ-1. Вимірювання проводять у спеціальній чотирьохелектродній кондуктометричній комірці з подальшим автоматичним перерахуванням отриманих значень електропровідності у значення вмісту золи. Діапазон вимірювання маси золи у відсотках до сухої маси – від 0,0018% до 0,9%.

Оцінка стану тварин і рослин.

Вимірювання міжелектродного імпедансу може бути використане у тваринництві для дослідження кровопостачання тканин [34].

У [33] наведено детальний аналіз даних імпедансної реографії, отриманих на вівцях та кролях. Дослідження проведені за допомогою стандартних двох- і чотирьохелектродною схемами. Частота вимірювального синусоїдального струму 100 кГц, сила струму 1-3 мА, площа вимірювальних електродів 3 см².

Результати експериментів якісно відповідають загальновідомим даним, отриманим на тканинах людини. Кількісні відмінності автори відносять на рахунок анатомічних особливостей тварин.

На базі біоелектроімпедансометрії запропоновано новий метод вивчення стану мікроциркуляції у м'яких тканинах тварин [29]. Він полягає у введенні до тканини тестуючої рідини з послідувальною реєстрацією динаміки очищення тканини від нього (визначення тканинного кліренсу). Цей процес здійснюється за допомогою вимірю-

вання електроімпедансу біологічної тканини у місті введення.

Експериментами на білих щурах доведено, що електроімпедансний метод дослідження дає змогу інструментально вивчати тканинний кліренс рідин із різними фізики-хімічними властивостями без використання радіоактивних речовин. Це, у свою чергу, відкриває можливість вивчати важливіші параметри мікроциркуляції: проникливість капілярів, швидкість локального кровотоку, дозволяє вивчати дію вазоактивних речовин на локальний кровоток [29].

Лабораторна техніка широко використовується у ветеринарії [2, 21, 26]. Серед численних методів своє місце у цьому переліку займає імпедансометрія. Як у всякому непрямому методі дослідження, перша і головна проблема його використання – відповідність вимірюваного параметра фізіологічній характеристиці, що визначається. Науковцями казанської школи були проведені найбільш об'ємні дослідження питомої ЕП великої рогатої худоби, свиней, вівців, кролів та мишей. Експерименти проводили за допомогою спеціально сконструйованих кондуктометра та комірки з електродами зі сталі марки 30Х13 [20]. Показано, що питома ЕП крові залежить від значення гематокрита (Ht), але відрізняється для різних типів тварин, що підтверджено у монографії [2]. Ця залежність добре описується виразом:

$$\text{питома ЕП} = V \cdot e^{\beta \cdot Ht}, \quad (1)$$

де V і β – коефіцієнти, які визначаються типом тварин. Коефіцієнт кореляції між значеннями, що отримані кондуктометричним та центрифужним методом за допомогою центрифуги "Целокрит-2" (Швеція), знаходяться у діапазоні 0,87-0,97.

У роботі також наведені криві взаємозалежності рівня гемоглобіну (Hb) та питомої ЕП обробленої кислотою крові.

Експериментально підтверджено, що перехід від візуального способу оцінки швидкості осідання еритроцитів (ШОЕ) до кондуктометричного відкриває можливість автоматизації та прискорення визначення ШОЕ.

У 1961 році у Литовській ветеринарній академії було розроблено спосіб визначення оптимального часу запліднення корів. Метод полягав у різниці електричного опору слизової піхви тварин. Далі метод був випробуваний у різних модифікаціях на коровах та свиноматках. Зроблено висновки, що, крім визначення часу запліднення метод може давати цінну інформацію при ранньому виявленні вагітності тварин. Причому ха-

рків'яни Ф. У. Осташко та С. В. Денисова запропонували проводити діагностику вагітності та безпліддя за електропровідністю проби цервікального секрету [32].

На жаль, більшість досліджень питомої ЕП проведена без урахування поляризаційних ефектів на низьких частотах вимірювального струму, що давало значну розбіжність результатів.

У сімдесятих роках минулого століття в інституті фізіології тварин, який займався розробками в області сільського господарства Англії, було виявлено, що визначення ЕП молока дає можливість проводити ранню діагностику маститів у корів [32]. Були розроблені спеціальні прилади для інструментальної діагностики маститів [13, 24, 25]. Показано, що електрофізичні параметри молока дають інформацію про його якість [7].

Водно-сольовий баланс організму тварин відіграє суттєву роль у підтриманні загального гомеостазу. Кількість рідини відрізняється для різних типів тканин і може значно коливатися при різних типах патології [3, 23]. Відомо, що кількість води у біологічних тканинах тісно пов'язана з їх ПЕП [35, 37].

У роботі [30] показана можливість використання визначення ЕО для оцінки ступеню гідратації підшкірної клітковини та м'язів у нормі й при штучному набряку у білих лабораторних щурів. Експерименти були проведені за допомогою голчатих електродів у широкому діапазоні частот. Результати експериментів підтвердили тісний взаємозв'язок пасивних електричних властивостей та гідратації тканин. Різниця в нормі та при штучному набряку складала, у середньому, $\sim 24,5\%$. Аналогічні результати отримані у [4, 39].

Враховуючи можливість використання поверхневих, неінвазивних електродів і перспективу диференційованого визначення клітинної та позаклітинної води, імпедансний метод може бути корисним не лише в експерименті, а й у

практиці ветеринарії [41].

Прикладом широких можливостей практичного використання БЕІ може також служити застосування для дослідження фотосинтезу та дихання рослин у польових умовах [9, 10].

Висновки:

1. Короткий огляд свідчить, що використання ПЕП біологічних тканин можуть бути корисними у різноманітних галузях сільського господарства. Доцільною видається класифікація визначення ПЕП: методики для оцінки якості сільськогосподарської продукції; методики для визначення інформативних характеристик стану тварин і рослин в експерименті та на практиці. Практично всі ПЕП можуть бути використані для вирішення задач сільського господарства. Особливо корисними вони можуть бути при дослідженні процесів, при яких змінюється склад тканин. При цьому необхідно враховувати анатомічні, фізіологічні, біофізичні, біохімічні особливості досліджуваних біологічних об'єктів.

2. Привабливість використання ПЕП полягає у швидкості, неінвазивності, безпечності процедури вимірювання. Можливості сучасної техніки дозволяють проводити вимірювання з малою, наперед заданою похибкою. Об'єктивність отриманих даних досить важлива як у великих, так і в маленьких фермерських господарствах.

3. Впровадження спеціалізованих приладів, заснованих на ПЕП, доводять перспективність практичного застосування підходу, що обговорюється. Однак для його поширення для всіх нових приладів необхідно вибирати вимірювальні параметри, що дають змогу звільнитися від приелектродних (поляризаційних) явищ. Прилади повинні бути малогабаритними, легкими, простими у використанні та обов'язково забезпечені практичними методиками використання й перевірки.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Алейников А. Ф.* // Сб.: Приборы и системы управления и контроля сельского хозяйства. – Новосибирск, 1984. – С. 68-96.
2. *Андреев В. С.* Кондуктометрические методы и приборы в биологии и медицине. – М.: Медицина, 1973. – 336 с.
3. *Афонский С. И.* Биохимия животных. – М.: Высшая школа, 1960. – 160 с.
4. *Безуглов В. К.* О связи параметров вольтамперной характеристики тканей растений с показателями водного обмена в них // В сб.: Состояние воды и энергетический обмен растений. –

Казань, 1975. – С. 102-113.

5. *Бензарь В. К.* Техника СВЧ-влажнометрии. – Минск: Высшая школа, 1974. – 352 с.

6. *Берлинер М. А.* Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – 402 с.

7. *Будзко И. А.* [и др.] Электрофизические параметры молока и разработка приборов для контроля качества // Вестник сельскохозяйственных наук. – 1974. – № 6. – С. 61-64.

8. Вимірювач вологості зерна "Дніпро-3". Проспект НВК "МОТОМ", Львів. <http://motom.com.ua/dnipro3.html>

9. *Вознесенский В. Л.* Кондуктометрический прибор для измерения фотосинтеза и дыхания растений в полевых условиях. – Л.: Наука, 1967. – 76 с.
10. *Вознесенский В. Л.* Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений. – М.-Л.: Наука, 1965. – 165 с.
11. *Гальмутдинов Р. Я., Тукушаитов Р. Х.* Электрические методы диагностики и терапии в ветеринарии. Методы электровоздействия в животноводстве. (Тематический указатель литературы.) – Казань, 1980. – 22 с.
12. *Голодрича П. Я., Осипов А. В.* Экспресс-метод и приборы для диагностики морозоустойчивости растений // Физиология и биохимия культурных растений. – 1972. – Т. 4. – Вып. 6. – С. 650-655.
13. *Губарь В. И., Грещенко Е. В.* Автоматический индикатор мастита у дойных коров // Сб.: Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем (тезисы докладов). – К., 1985. – С. 49.
14. Индикатор "Тигран-ДИ". Проспект фирмы "Медас", Москва. – 1 с.
15. *Китлаев Б. Н.* Биофизические критерии, характеризующие морозоустойчивость зерновых растений // Доклады ВАСХНИЛ. – 1971. – № 11. – С. 161-164.
16. *Китлаев Б. Н., Третьяков Г. И., Дубоносов Т. С., Айдиев А. Я.* Способ определения морозоустойчивости растений. – А. С. 488548 А61В 5/00. Бюллетень изобретений, 1975, № 39. – С. 21.
17. *Крушевский Ю. В., Сульян В. Я.* Полуавтоматический фазовый измеритель содержания капиллярной влаги в зерне // Тезисы докладов на республиканской НТК "Информатика и автоматизация в регионах". – Винница, 1988. – С. 107.
18. Лабораторный кондуктометр-золомер КЛЗ-1. Проспект фирмы "Медас", Москва. – 1 с.
19. *Лазарев И. З.* О возможности индикации периода покоя клубней картофеля и особенностей его протекания по кинетике электропроводности внутренней ткани // Физиология растений. – 1959. – Т. 6. – Вып. 5. – С. 579-584.
20. *Латыпов М. М.* Разработка кондуктометрических способов ускоренного определения ряда гематологических показателей у сельскохозяйственных животных. – Автореферат ... к.т.н. – Казань, 1990. – 20 с.
21. *Мейер Д., Харва Дж.* Ветеринарная лабораторная медицина. Интерпретация и диагностика / Пер. с англ. – М.: Софион, 2007. – 332 с.
22. *Мельницкий В. И., Бидюкова Г. Ф.* Определение относительной морозоустойчивости закаленных проростков озимой пшеницы методом регистрации электрического сопротивления // Физиология растений. – 1965. – Т. 12. – Вып. 4. – С. 688-693.
23. *Пресман А. С.* Электромагнитные поля и живая природа. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
24. *Романов В. М.* Разработка электрического метода и технических средств ранней диагностики мастита коров для молочно-промышленных ферм и молочных комплексов. – Автореферат ... канд. дис. – ВНЭСХ, 1979. – 21 с.
25. *Рязанский М. П.* Подсчет клеток в молоке с помощью скоростного автоматического счетчика // Лабораторное дело. – 1972. – № 5. – С. 312.
26. *Савицкий В. И., Рыкунов В. А., Клецев С. А.* Способ определения жизнеспособности биологических тканей. – А. С. № 942693 А61В 10/00 1980. – Бюлл. № 4. – С. 18.
27. *Синькоп Ю. С., Сатанівський В. В.* Проектування та розробка приладу вимірювача вологості сипучих матеріалів методом НВЧ // Електроніка і зв'язь. Тематичний випуск "Проблеми електроніки", Ч. 2. – 2008. – С. 183-186.
28. *Синькоп Ю. С., Сатанівський В. В.* Оцінка похибок приладу вимірювача вологості сипучих матеріалів методом НВЧ // Електроніка і зв'язь. – 2010. – № 4. – С. 96-98.
29. *Смердов А. А., Соколов С. Е., Смердова Т. А.* Електроімпедансний метод дослідження мікроциркуляції у тварин // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2010. – № 1. – С. 151-153.
30. *Ступко А. И., Шейман Е. С., Соколов С. Е.* Вольт-амперные характеристики тканей крыс при декстрановом отеке // В кн.: Всесоюзная конференция по физиологии почек и водно-солевого обмена. – Новосибирск, 1981. – С. 257-258.
31. *Тарусов Б. Н., Кольс О. Р.* Биофизика. – М.: Высшая школа, 1968. – 468 с.
32. *Тукушаитов Р. Х., Гильмутдинов Р. Я.* Применение электрических методов для диагностики функционального состояния репродуктивных органов сельскохозяйственных животных (методические рекомендации). – Казанский ветеринарный институт – Казань, 1980.
33. *Тукушаитов Р. Х., Гарифуллин Р. Л.* Об импедансной структуре межэлектродной ткани и ее влиянии при оценке реографических показателей // Ученые записки Казанского ветеринарного института им. Н. Э. Баумана. – 1977. – Т. 128. – С. 62-66.
34. *Тукушаитов Р. Х., Новошинов Г. П.* Биофизи-

- ческие основы и техника ветеринарной реовазографии. – Казань, 1975. – 44 с.
35. *Федишин Я. І.* Фізика з основами біофізики. – Львів: Світ, 2005. – 542 с.
36. *Федорова Г. М.* Влияние отрицательных температур на низкочастотное электрическое сопротивление озимой пшеницы и ржи // Физиология растений. – 1965. – Т. 12. – Вып. 4. – С. 688-693.
37. *Хасциев Б. Д.* Основы мониторинга продуктов питания импедансными бактометрами // Медицинская техника. – 1996. – № 5. – С. 41-43.
38. *Charpentier J., Goutefongea R., Sale P., Thomasset A.* La discrimination des viandes fraiches et congelees par mesures d'impedance a deux frequences // Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys – 1972. – № 12(1). – P. 173-178.
39. *Hart Francis X.* The extremely low frequency electrical properties of plout stems // Bioelectromagnetics, 1985, V. 6, № 3, P. 243-256.
40. In-situ Qualitätsbewertung von biologischen Geweben, Lizenzen, Karl-Marx Universität, Leipzig. Sale P. Augmentation de la conductivite electrique des viandes consécutives on processus de condelation – decondelation // C. R. Acad. Sci., Paris, 1969, 269, serie D, 2136-2139.
41. *Thomasset A.* Proprietes bioelectriques des tissus. Mesure de l'impedance en clinique // Lyon Med. – 1962 – № 28. – P. 107-109.
42. *Thomasset A.* Methode et appareil pour mesure de l'impedance des tissus biologiques. Bioelectrodes // Brevet France et étranger, № 1344-459. – P. 7.