

УДК 621.39

Хмарний сервіс візуального моніторингу динаміки функціонального стану пацієнта за параметрами електричного біоімпедансу

Мосійчук В. С., Шарпан О. Б.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

E-mail: sharpan@tor.kpi.ua

Представлено результати розроблення власного хмарного сервісу і гнучкого веб-інтерфейсу системи електричної біоімпедансометрії, яка використовується в задачах діагностики складу тіла і його біогідратності. Система може бути використана як окремо, наприклад у разі вирішення питань контролю складу тіла в герантології, кардіології, нефрології, дієтології, спортивній медицині тощо, так і як вбудований додаток для інших медико-технічних засобів, наприклад для гемодіалізу. Вона забезпечує організацію і зручний оперативний контроль протікання діагностичної або лікувальної процедури, що пов'язана з необхідністю визначення і динаміки складу тіла людини на основі безпосереднього визначення і динаміки складових параметрів електричного біоімпедансу (модуля, фазового кута, активної і реактивної складових) в розширеній смузі частот. Особливості і умови реалізації такої системи розглянуто на прикладі задачі діагностики динаміки водного статусу людини безпосередньо протягом сеансу ультрафільтрації під час процедури гемодіалізу. У цьому разі структура об'єднує в єдину систему апарат “штучної нирки”, біоімпедансометр та хмарний сервіс і здійснює обробку вхідних даних. Вимірювання параметрів електричного біоімпедансу здійснюються на трьох фіксованих частотах 20 кГц, 100 кГц і 500 кГц в автоматичному режимі протягом всього сеансу ультрафільтрації. Отримані дані під час вимірювань відображається у веб-інтерфейсі. Як діагностичні показники застосовуються зазначені параметри імпедансу, а також положення векторів імпедансу на комплексній площині відносно “еліпсів толерантності”. Орієнтуючись на динамічні зміни параметрів біоімпедансу, можна об'єктивно оцінювати динамічний функціональний стан пацієнта та корегувати проходження будь-якої лікувальної процедури.

Ключові слова: електричний біоімпеданс, моніторинг, функціональний стан, контроль складу тіла, еліпси толерантності, гемодіаліз, ультрафільтрація, веб-інтерфейс

DOI: [10.20535/RADAP.2021.84.57-65](https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.84.57-65)

Постановка задачі

В ряду завдань визначення функціонального стану людини застосовують методи кількісної оцінки складу тіла непрямыми методами “in vivo”. За останні три десятиліття ця область біомедичних досліджень швидко розвивається і виділилася в окремий науковий напрям, який одержав назву науки про склад тіла. Сучасний етап його розвитку характеризується збільшенням ролі нових технологій і методів дослідження та відповідної апаратури. Сформувався і стало загальноприйнятим судження про склад тіла не лише за антропометричними індексам, а на основі апаратних методів, які використовують біофізичні властивості різних тканин організму. Поряд з традиційними методами антропометрії, каліперометрії і підводного зважування, отримали розвиток інші біофізичні методи — ізотопні, рентгенівської абсорбціометрії, ядерного ма-

гнітного резонансу та електричного біоімпедансу (далі — біоімпедансу).

У більшості ситуацій визначення складу тіла необхідно проводити в реальному масштабі часу, причому не обов'язково в стаціонарних умовах клініки. Тому всі ці методи не завжди можуть бути використані або через особливі умови застосування, або складність і дороговизну вимірювань. Саме тому методологія біоімпедансного аналізу, яка найбільш просто реалізуєма “in vivo” і доступна для широких верств населення. Біоімпедансометрія має практичне застосування в швидкій діагностиці функціонування організму та виявленні патологій, а об'єктами досліджень можуть бути як увесь організм людини в цілому, так і його окремі сегменти [1–21].

Методи біоімпедансометрії дозволяють визначати стан різноманітних секторів тіла людини (безжирову і жирову масу, діелектричні властивості біотканин, загальний об'єм і співвідношення внутрі-

шньоклітинного і зовнішньоклітинного об'ємів рідини, тощо). Їх результати достатньо строго корелюють з ізотопними і іншими методиками, які визнані «золотим стандартом» визначення секторів тіла людини [1, 5–8, 11]. Вони активно впроваджуються в багато сфер медицини: біофізику [9, 10], визначення діелектричних і функціональних характеристик біологічних тканин [1, 2, 11–17] і трансплантології [14, 16], кардіологію [18], нефрологію [1–4, 17], дієтологію [6, 8, 19, 20], спортивну медицину [8, 12, 21] та інші. Імпедансометрія також використовується для визначення стану рослинної продукції [22].

Незважаючи на достатньо тривалу історію розвитку біоімпедансометрії, сучасні вимоги медико-біологічної діагностики обумовлюють завдання подальшого вирішення ряду методологічних і технічних питань. Актуальними є задачі розвитку методик діагностики за визначенням всіх складових [1, 12–14] імпедансу, причому не лише на фіксованій частоті, як це використовується, наприклад в [15–18], а й в розширеній смузі частот [1, 2, 12, 19, 21, 22]. Для розвитку нових можливостей діагностики необхідним є подальший розвиток методики і апаратури діагностики на основі визначення фазового кута [2, 8, 16, 19, 23–26] та векторного аналізу [3, 4, 10, 18, 19, 21] біоімпедансу. Вимоги підвищення оперативності отримання та інтерпретації діагностичних результатів, зручності роботи і доступності діагностичних процедур, можливості оброблення вимірювальної інформації не лише на місці проведення вимірювань, а й з використанням віддалених серверів і «хмарних технологій» передачі інформації обумовлюють необхідність створення апаратури, методик і технологій діагностики із застосуванням сучасних цифрових технологій охорони здоров'я ("Digital Health and Big Data").

Одною з сучасних проблем контролю складу тіла і стану біогідратності на основі результатів біоімпедансних вимірювань як під час процедури гемодіалізу, так і в інших ситуаціях, є те, що результати вимірювань потребують обробки для отримання діагностичних показників, що характеризують параметри складу тіла, наприклад біогідратніть. Самі показники, що фіксуються за допомогою біоімпедансометра, опосередковано несуть діагностичну інформацію, а отже потребують попередньої обробки для аналізу. Як правило це вже відбувається після завершення процедури, що обмежує оперативність діагностики і не в повній мірі задовольняє вимоги контролю біогідратності. Імпедансометри, що вбудовані до інших медичних апаратів, якщо вони є, наприклад до апаратів «штучної нирки», не завжди мають протокол передачі даних до хмарних сервісів, а лише фіксування поточних результатів, що є малоінформативним. Також не всі ті ж гемодіалізні апарати мають навіть такі опціональні додатки у вигляді біоімпедансометрів.

Проблеми з відсутністю інтегрованих імпедансометрів або з лише відображенням результатів вимірювання складових імпедансу на інтегрованих у інші медичні діагностичні або лікувальні апарати вирішуються за допомогою підключення зовнішнього пристрою, як це описано, наприклад, в [27]. Для мінімізації ручної рутинної обробки можна удосконалити біоімпедансометри, вбудовуючи в нього спеціалізоване програмне забезпечення для вирішення потрібної задачі. Це ускладнює його використання в інших задачах діагностики. Інший підхід полягає у створенні спеціалізованої або універсальної інформаційної системи, в якій обробка параметрів біоімпедансу виконується або безпосередньо на місці виконання вимірювань, або віддалено на стороні сервера. В останньому разі відомий стандарт DICOM разом з PACS наразі не може бути застосований через передачу біоімпедансометром не зображення, а потоку даних.

Метою статті є опис розробленого хмарного сервісу та гнучкого веб-інтерфейсу системи біоімпедансометрії в задачах діагностики складу тіла і його біогідратності, що здатний забезпечити організацію і зручний оперативний контроль протікання тієї чи іншої діагностичної або лікувальної процедури.

1 Реалізація системи

Особливості і умови реалізації такої системи розглянемо на прикладі задачі діагностики динаміки водного статусу людини безпосередньо протягом сеансу ультрафільтрації під час процедури гемодіалізу з використанням результатів вимірювань параметрів імпедансу, отриманих в [27]. Задача розвитку технології імпедансометрії і варіантів її апаратної реалізації для визначення "in vivo" і об'єктивного контролю динаміки біогідратності організму людини в процесі гемодіалізу ультрафільтрації є актуальною [1–4]. Такий контроль надзвичайно важливий з точки зору вчасного припинення процедури ультрафільтрації і досягнення рівня "сухої ваги", оскільки як недостатня дегідратація, так і гіпергідратація супроводжуються важкими наслідками [2, 3].

Інтерфейс контролю динаміки гідратності під час діалізу за допомогою біоімпедансних параметрів може бути реалізовано через адаптивний веб-інтерфейс як для стаціонарних, так і мобільних комп'ютерів. Структура об'єднує в єдину систему апарат «штучної нирки», біоімпедансометр та хмарний сервіс, що здійснює отримання, зберігання, оброблення та відображення даних.

Для створення хмарного сервісу використано об'єктно-орієнтований компонентний фреймворк Yii, який використовує найбільш популярний серед фреймворків архітектурний патерн MVC (Model-View-Controller) для організації коду. Архітектура MVC ділить дані програми і керуючої логіки на

окремі компоненти, що дозволяє модифікувати кожного окремо і незалежно. Тобто модель надає дані предметної області виду і реагує на команди контролера, змінюючи свій стан. Вид відповідає за відображення даних предметної області (моделі) користувачеві, реагуючи на зміни моделі. Контролер інтерпретує дії користувача, сповіщаючи модель про необхідність змін.

Крім MVC, Yii-додатки також мають такі сутності: вхідні скрипти — це PHP скрипти, які доступні кінцевому користувачеві програми; додатки, які є глобально доступними об'єктами, що здійснюють коректну роботу різних компонентів програми та їх координацію для обробки запиту; компоненти програми — об'єкти, зареєстровані в додатку і надають різні можливості для обробки поточного запиту; модулі — самодостатні пакети, які включають в себе повністю всі засоби для MVC.

Додаток може бути організовано за допомогою декількох модулів: фільтри — це код, який повинен бути виконаний до і після обробки запиту контролерами; віджети — це об'єкти, які можуть включати в себе представлення. Вони можуть містити різну логіку і бути використані в різних місцях. Всі запити, оброблювані Yii додатком¹, проходять шлях, наведений в схемі системи на рис. 1. Дані завантажуються з бази даних MySQL.

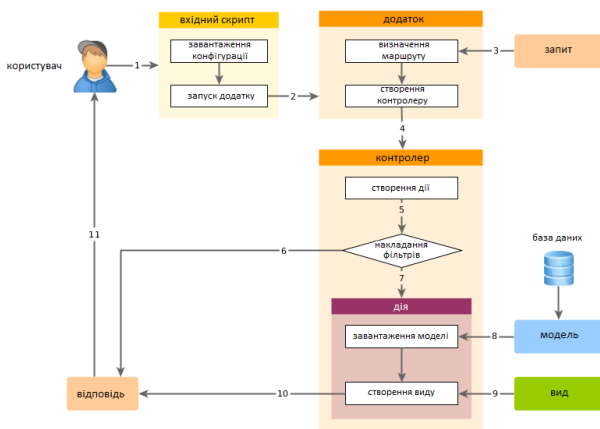


Рис. 1. Структурна схема обробки запитів додатком на основі Yii2 фреймворком

У результаті маємо веб-інтерфейс для користування, який передбачає авторизацію у особистий кабінет, а сам особистий кабінет має вигляд рис. 2.

Оператор має змогу додати пристрої обстеження з переліком вимірювальних параметрів до кожного (рис. 3). У оператора є база пацієнтів, яку він створює, вносячи кожного пацієнта окремо в картотеку. Починаючи вимірювання, оператор розпочинає старт нового сеансу, заповнюючи відповідні відомості про нього. Це можна зробити як перед початком сеансу досліджень і контролю, так і в процесі цього.

¹<https://www.yiiframework.com/doc/guide/2.0>

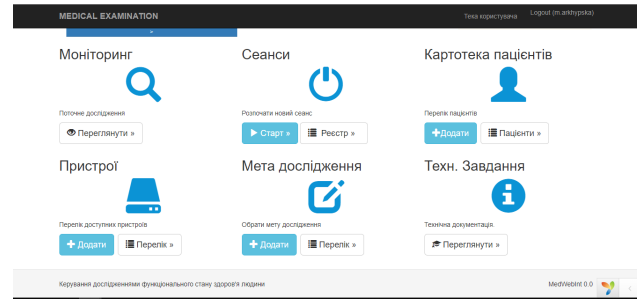
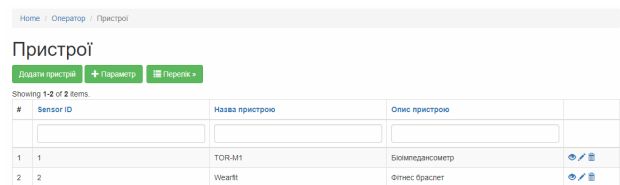
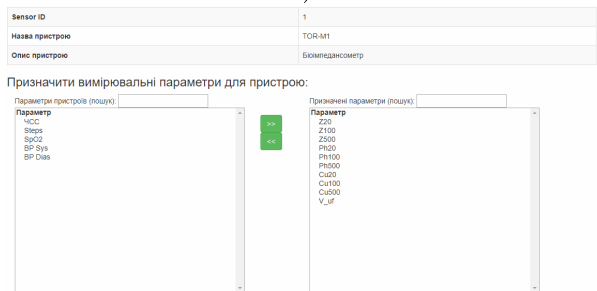


Рис. 2. Графічний інтерфейс особистого кабінету оператора інформаційної системи



а)



б)

Рис. 3. Перелік зареєстрованих пристроїв-постачальників даних та визначення параметрів пристрою оператором інформаційної системи

На даному етапі оператор має можливість обрати пацієнта, зазначити хто саме проводить дослідження, який пристрій використовується, початок та кінець сеансу. Тому необхідно створити таблицю, котра буде зв'язана з переліченими елементами, та зберігати вказаний проміжок часу. Дана таблиця зв'яже такі дані: який пристрій використовується в даній сесії; пацієнт, який бере участь в дослідженні; мета дослідження, відповідно до якої проводиться даний сеанс; інформацію про оператора, хто саме проводив сеанс вимірювання; опис фізичного стану пацієнта за його зовнішніми ознаками; час початку сеансу; час завершення вимірювання. У будь-який час оператору доступний реєстр всіх попередніх досліджень. Веб-сторінка поточного дослідження, збереженого в базі даних, має вигляд, що наведений на рис. 4.



Рис. 4. Загальний вигляд інтерфейсу монітора сеансу гемодіалізу з графічним відображенням динаміки змін параметрів імпедансу у часі з наближенням до еліпсів толерантності

2 Опис прикладів проведення експериментів та накопичення клінічних даних

Для демонстрації прикладу розроблення веб-технології імпедансометрії використано результати вимірювання параметрів біоімпедансу в Харківському обласному клінічному центрі урології та нефрології ім. В.І. Шаповала під час процедури гемодіалізу. Опис методики і результатів вимірювань параметрів біоімпедансу представлені в [27]. Як біоімпедансометр, був обраний тричастотний прилад TOP M-1, розроблений на кафедрі ТОР КПІ імені Ігоря Сікорського, який забезпечував вимірювання параметрів біоімпедансу на трьох фіксованих частотах 20 кГц, 100 кГц і 500 кГц. Як апарат “штучної нирки” — Fresenius Medical Care 5008S з можливістю зміни швидкості ультрафільтрації в ручному та автоматичному режимах. Тривалість процедур становила до 4 години. Ультрафільтрація проводилася в обсязі, необхідному для досягнення стану “сухої ваги”.

3 Аналіз результатів експериментів на основі розробленої інформаційної технології

Інтерфейс системи діагностики розроблявся виходячи з того, що сучасною тенденцією розвитку методу біоімпедансного аналізу складу тіла в епідеміологічних і клінічних дослідженнях є оцінка можливості безпосереднього використання первинних параметрів імпедансу без додаткового перетворення їх у діагностичні показники. В цьому разі використовуються безпосередньо параметри імпедансу (модуль, активна, реактивна складові, фазовий кут). Також, одним із способів подання результатів вимірювань для визначення параметрів складу тіла є векторний аналіз біоімпедансу [3, 4, 10, 18, 19, 21].

Інтерфейс монітору ПК, який характеризує основні можливості інформативності розробленої технології, наданий на рис. 4. Він складається з таких структурних елементів. Зверху надана таблиця протоколу з бази пацієнта, нижче надані графіки динаміки значень модуля і фазового кута імпедансу, виміряних на трьох частотах, внизу – графіки динаміки векторів імпедансу на цих частотах (червоний, синій, оранжевий) відносно “еліпсів толерантності”, побудованих для кожного пацієнта персонально.

У разі векторного аналізу результати вимірювань зображаються графічно у вигляді точки Z -площини в прямокутній системі координат по осях активного водно-електролітного опору R/DT і реактивного (ємнісного) опору XC/DT , нормованих відносно довжини тіла DT . Вони зіставляються з областю референтних значень параметрів імпедансу (активної і реактивної складових), отриманих шляхом чисельних вимірювань на частоті 50 кГц в загальній популяції. Ці області значень формують так звані еліпси толерантності (синій, чорний і зелений еліпси на рис. 5) з областями відхилення від референтного (для даного віку і статі) значення в 50, 75 і 95% зони розподілу точок [4, 18]. Щільність розподілу має максимум, що є центром еліпсів, і дві перпендикулярні осі симетрії, які проходять через точку максимуму. Система вкладених еліпсів будувється на осях симетрії.

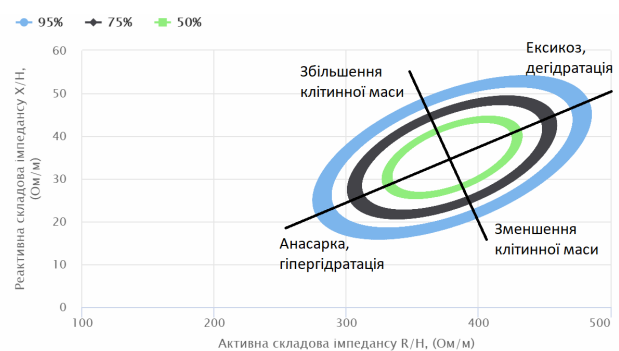


Рис. 5. Еліпси толерантності

Положення точки Z щодо еліпсів толерантності дозволяє судити про спрямованість і вираженості відмінностей параметрів пацієнта від середніх значень для даної популяції.

Виразність відмінностей характеризується відстанню між точками Z і центром еліпса. Напрямок відмінності точки Z вказує на характер змін гідратації, а також рівнів величин жирової і худой маси. Повторні вимірювання дають можливість за положенням точки Z відстежувати динаміку змін на якісному і кількісному рівнях. Під час процедури гемодіалізу ультрафільтрації ступінь наближення стану пацієнта до потрібного рівня "сухої ваги" оцінюється по ступеню наближення динаміки векторів імпедансу до еліпсів толерантності і попаданню їх в площини цих еліпсів. Використання такої інформаційної технології дає можливість в реальному масштабі часу відстежувати хід процедури ультрафільтрації і вчасно за об'єктивними показниками зупиняти її.

4 Обговорення результатів

Відмінність запропонованої інформаційної технології від традиційних така. Традиційно, у разі контролю функціонального стану за показниками векторного імпедансного аналізу, вимірювання параметрів імпедансу прийнято виконувати на фіксованій частоті 50 кГц [4, 17]. В цьому разі значення параметрів імпедансу (модуля, активної, реактивної складових і фазового кута) обумовлюються активною міжклітинною провідністю і частково реактивною внутрішньоклітинною провідністю, внаслідок того, що на частоті 50 кГц струм зміщення частково проходить через діелектричні структури, насамперед клітинні мембрани. Можливо з точки зору оцінки функціонального стану під час гемодіалізу ультрафільтрації це припустимо, так як у цьому разі, по-перше, видалення рідини відбувається насамперед з позаклітинного басейну і відносно достатньо швидко для відновлення водного балансу зовнішньоклітинного і внутрішньоклітинного середовища, по-друге, протягом тривалого часу накопичений практичний досвід використання такого підходу, який дає задовільні результати не лише у разі гемодіалізу [4], але й у інших ситуаціях [17]. Зокрема, про те, що протягом сеансу гемодіалізу видалення рідини відбувається насамперед із зовнішньоклітинного середовища свідчать графіки для модуля і фазового кута імпедансу на рис. 4. Видно, що мають місце помітні зміни модуля імпедансу, особливо на частотах 20 кГц і 100 кГц (рис. 6), в той час як протягом основної частини тривалості процедури фазові кути імпедансу змінювались мало. Лише на початковому етапі процедури зміни фазового кута більш помітні, при малій змінюваності модулів, що свідчить про те, що на початковому етапі відбувається швидка динаміка

балансу внутрішньоклітинної і зовнішньоклітинної рідини (в першу чергу відбувається ультрафільтрація вмісту внутрішньоклітинного середовища). Але в ряді інших ситуацій зокрема при оцінці структури і компонентного складу тіла та їх динаміки у дієтології [10, 11, 14, 17, 20], ринології [28], рослинної продукції [22] і ін. на думку авторів більш висока чутливість забезпечується у разі вимірювання параметрів імпедансу, і насамперед реактивної складової і фазового кута, в розширеній смузі частот. Тому в нашому разі вимірювання всіх параметрів імпедансу здійснюється в широкій смузі частот на трьох суттєво рознесених частотах.

Зазвичай у пацієнтів перед процедурою гемодіалізу вимірювані значення на всіх трьох частотах знаходяться у секторі збільшеної клітинної маси (рис. 7) та мають тенденцію впродовж процедури ультрафільтрації пересуватися до сектору дегідратації, що є цілком логічною динамікою.



Рис. 6. Динаміка зміни первинних параметрів з відображенням у веб-інтерфейсі

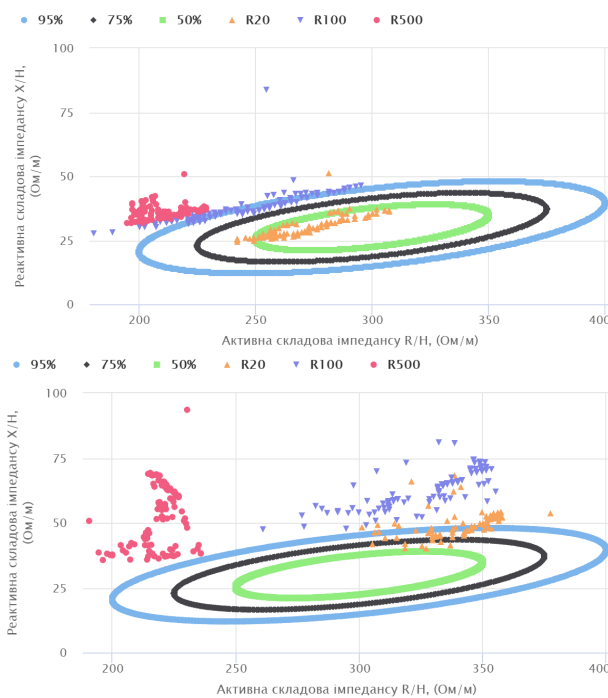


Рис. 7. Співставлення динаміки зміни параметрів імпедансу до персоналізованих еліпсів толерантності

Отже, орієнтуючись на зміни векторів біоімпедансу відносно еліпсів толерантності, можна об'єктивно оцінювати функціональний стан пацієнта та корегувати проходження процедури ультрафільтрації чи інших лікувальних процедур.

Висновки

Контроль динаміки гідратності, як складової структури тіла людини, показаний на прикладі процедури діалізу, реалізовано на основі вимірювання параметрів біоімпедансу інформаційно-вимірювальною системою, яка структурно об'єднує в єдину систему ширококутовий тричастотний вимірювач параметрів імпедансу і комп'ютерний веб-інтерфейс для оброблення вимірювальної інформації та візуалізації динаміки змін параметрів. Останній являє собою сукупність веб-сторінок, що надає зручний інтерфейс для взаємодії з сервісом та пристроями і забезпечує в реальному масштабі часу керування вимірювальною і лікувальною процедурами в ручному чи автоматизованому режимах. У результаті маємо можливість індивідуальної авторизації у особистий кабінет та перегляд попередніх чи поточних результатів вимірювань з прив'язкою до кожного пацієнта окремо.

Виміряні параметри біоімпедансу (модуль, активна, реактивна складові і фазовий кут імпедансу), що обрані для аналізу, оброблені та представлені у вигляді графіків. Характерні зміни значень параметрів імпедансу, залежно від об'єму видаленого ультрафільтрату, зазначають правильність проходження процедури діалізу. У процесі ультрафільтрації відбувається збільшення модуля імпедансу на всіх вимірювальних частотах — це свідчить про те, що на всіх рівнях (клітинна, позаклітинна рідина) відбувається поступова дегідратація порівняно з початковим станом. Зміни фазового кута дають уявлення про хід процесів балансу позаклітинної і внутрішньоклітинної рідин. Положення точок вимірювань $Z - (X(R))$ щодо референтних областей еліпсів толерантності дозволяє судити про спрямованість і вираженості відмінностей параметрів імпедансу пацієнта від середніх значень для даної популяції, а напрямок відмінності точок Z вказує на характер біогідратності та значення величин жирової і худой маси. Рух параметрів вектрів імпедансу в бік еліпсів толерантності дає підстави визначення моменту досягнення пацієнтом рівня «сухої ваги» і зупинення процедури ультрафільтрації у разі наближення до еліпсів толерантності чи попадання у їх площини. Повторні вимірювання дають можливість за положенням точок Z відстежувати динаміку змін на якісному рівні.

З графіків видно також, що під час процедури можуть бути артефактні явища. Під час ультрафільтрації можливе спостереження нелінійного

характеру зміни параметрів імпедансу. Є ймовірність артефактів — при проведенні визначення рівня гідратації організму, пацієнт не повинен робити зайвих рухів під час процедури. Можлива поява некоректних даних на біоімпедансограмі, якщо перед процедурою пацієнт займався фізичною працею, переніс авіапереліт або до нього були застосовані дії інтенсивної терапії. Ця нелінійність є індивідуальною для кожного пацієнта.

Для цього потрібно переконатися у правильності проведення вимірювання та порівняти результати з попередніми, щоб визначити індивідуальні нелінійності. Одним із способів подання результатів вимірювань біоімпедансу є векторний аналіз біоімпедансу.

Наразі в кінці процедури гемодіалізу проводиться опитування суб'єктивних відчуттів пацієнта, а також огляд лікарем, з подальшим висновком стосовно проведеної процедури. За допомогою розробленої інформаційної технології, орієнтуючись на зміни векторів біоімпедансу відносно еліпсів толерантності та тенденції динаміки модулю та фази біоімпедансу відносно вилученого об'єму ультрафільтрату, характеру динаміки змін параметрів, можна об'єктивно оцінювати функціональний стан пацієнта та конкретно його біогідратність, корегувати індивідуальні методики і швидкісні параметри ультрафільтрації.

Запропонована технологія також придатна для використання в інших ситуаціях, зокрема в кардіології, нефрології, дієтології, ринології, спортивній медицині, оцінці стану рослинної продукції тощо.

Перелік посилань

1. Рахматуллина Л. Н. Применение биоимпедансного монитора состава тела (ВСТМ) в клинической практике у диализных больных (обзор литературы) / Л.Н. Рахматуллина, К.Я. Гуревич // Нефрология. - 2013. - Т. 17, № 4. - с. 49-57.
2. Строков А.Г. Персистирующая и интермиттирующая гипергидратация у пациентов на программном гемодиализе: методы оценки и коррекции / А.Г. Строков, В.А. Терехов, Я.Л. Поз, К.Н. Крышин, Ю.В. Копылова // Вестник трансплантологии и искусственных органов. - 2015. - Т. 17, №1. - с. 103-108.
3. Вишневский К.А. Коррекция «сухого веса» у больных, получающих лечение программным гемодиализом, по результатам векторного анализа биоимпеданса / К.А. Вишневский, Р.П. Герасимчук, А.Ю. Земченков // Нефрология. - 2014. - № 2. - С. 61-71.
4. Piccoli A. Bioelectric impedance vector distribution in peritoneal dialysis patients with different hydration status / A. Piccoli // Kidney International - Vol. 65, Iss. 3. - pp. 1050-1063.
5. Grimnes S. Bioimpedance and bioelectricity basics / S. Grimnes, O.G. Martinsen. - Amsterdam: Elsevier, 2008. - 471p.
6. Торнуев Ю.В. Диагностические возможности неинвазивной биоимпедансометрии / Ю.В. Торнуев, Д.Л.

- Непомнящих, Д.Б. Никитюк, Г.А. Лапий и др. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 10 (4). – С. 782-788.
7. Kyung-Wan Baek Validation of Dual Energy X-Ray Absorptiometry and Nuclear Magnetic Resonance in the Analysis of Body Composition in Mice / Kyung-Wan Baek, Ji-Seok Kim, Jin Sung Park, So-Jeong Kim, Yong-Chan Ha, Ok-Yi Jeong, Jun-Il Yoo. – 2020. <https://doi.org/10.11005/jbm.2020.27.4.291>
8. Николаев Д.В. Биоимпедансный анализ состава тела человека / Д.В. Николаев, А.В. Смирнов, И.Г. Бобринская, С.Г. Руднев. - М. : Наука, 2009. - 392 с.
9. Barni S. Detection of Allergen-IgE interaction in Allergic Children Through Combined Impedance and ROS Measurements / S. Barni, A. Fort, M. Becatti, C. Fiorillo et al. // IEEE transactions on instrumentation and measurement. - 2017. - Vol. 66, No. 4 - pp. 616-623.
10. Buffa R. Bioelectrical impedance vector analysis (BIVA) for the assessment of two-compartment body composition / Buffa R., Mereu E., Comandini O., Ibanez M.E., Marini E. // Eur J Clin Nutr. – 2014. – Vol. 68, No 11. – pp. 1234-40.
11. Urinary Creatinine Based Equations for Estimation of Fat Free Mass in Patients with Intestinal Insufficiency or Intestinal Failure / Nanna Dyhre-Petersen, Marianne Køhler, Henrik Højgaard Rasmussen // Clinical Nutrition ESPEN. – 2021. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2021.01.040>
12. Matias C. N. Fat-free Mass Bioelectrical Impedance Analysis Predictive Equation for Athletes using a 4-Compartment Model / C. N. Matias, F. Campa, D. A. Santos, H. Lukaski, L. B. Sardinha, A. M. Silva / International Journal of Sports Medicine, Georg Thieme Verlag KG. – 2020. – No 1. – с. 27-32.
13. Kyung-Wan Baek Validation of Dual Energy X-Ray Absorptiometry and Nuclear Magnetic Resonance in the Analysis of Body Composition in Mice / Kyung-Wan Baek, Ji-Seok Kim, Jin Sung Park, So-Jeong Kim, Yong-Chan Ha, Ok-Yi Jeong, Jun-Il Yoo. – 2020.
14. Martine J. Sealy Low muscle mass is associated with early termination of chemotherapy related to toxicity in patients with head and neck cancer / Martine J. Sealy, Tanadech Dechaphunkul, Cees P. van der Schans, John Walker, Harriët Jager-Wittenaar, Vickie E. Baracos // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, vol. 2019, no. 02, pp. 029-029.
15. Zambone M.A. Anthropometry, bioimpedance and densitometry: Comparative methods for lean mass body analysis in elderly outpatients from a tertiary hospital / M. A. Zambone, L. S. Garcia, M. L. Bueno // Molecular Catalysis, Vol. 490, p. 111020. DOI: 10.1016/j.exger.2020.111020
16. Цейтлин Г.Я. Значение биоимпедансного анализа и антропометрии для прогнозирования осложнений у детей с онкологическими и неонкологическими заболеваниями после трансплантации гемопоэтических стволовых клеток / Г.Я. Цейтлин, А.Ю. Вашура, М.В. Коновалова, Д.Н. Балашов, М.А. Масчан, С.В. Бельмер // Онкогематология. - 2013. - Том 8, № 3. - с. 48-54.
17. Amaroa P. P. Déficit nutricional relacionado con la enfermedad renal Nutritional deficit related to kidney disease / Pilar Peña Amaroa, Pedro Pancorbo Hidalgo, Victoria Gálvez Gómezb, Juana María Granero Moyac.a Universidad de Jaén, Jaén, España, b Hospital Médico Quirúrgico Ciudad de Jaén, Jaén, España, c Hospital San Juan de la Cruz // Original Article Journal of Bone Metabolism. – 2020. – Vol. 27, No 4. – pp. 291-299.
18. Walter-Kroker A. A practical guide to bioelectrical impedance analysis using the example of chronic obstructive pulmonary disease / A. Walter-Kroker, A. Kroker, Muriel M. Mattiucci-Guehlke et al. // Nutrition Journal. – 2011. – 10:35.
19. Fassini P.G. Bioelectrical impedance vector analysis as a useful predictor of nutritional status in patients with short bowel syndrome / P.G. Fassini, C.F. Nicoletti, K. Pfrimer, C.B. Nonino, J.S. Marchini, E. Ferrioli // Clin Nutr. – 2017. – Vol 36, No 4. – pp. 1117-1121.
20. Шарпан О. Б. Динаміка частотних залежностей параметрів електричного імпедансу людини в процесі сухого голодування / О.Б. Шарпан, В.С. Мосійчук // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2017. – Вип. 70. – с. 43-48.
21. Carrasco-Marginet M. Bioelectrical impedance vector analysis (BIVA) for measuring the hydration status in young elite synchronized swimmers / Carrasco-Marginet M, Castizo-Olier J, Rodríguez-Zamora L, Iglesias X, Rodríguez FA, Chaverri D, Brotons D, Iruiria A. // PLoS One. – 2017. – Vol. 12, No 6. – e0178819
22. Paterno A. Efficient Computational Techniques in Bioimpedance Spectroscopy / A. Paterno, L. H. Negri, P. Bertemes-Filho // Applied Biological Engineering - Principles and Practice. Edited by Ganesh R. Naik, 674 pages, Publisher: InTech, Chapters published March 23, 2012. pp. 4-28.
23. Colín-Ramírez E. Bioelectrical impedance phase angle as a prognostic marker in chronic heart failure / E. Colín-Ramírez // Nutrition. - 2012. - Vol. 28, No 9. - pp. 901-5.
24. Santarpià L. Prognostic significance of bioelectrical impedance phase angle in advanced cancer: preliminary observations / L. Santarpià, M. Marra, C. Montagnese et al. // Nutrition. - 2009. - Vol. 25(9). - pp. 930-1.
25. Ярошенко В.Т. Варіанти біоімпедансометрії при вивченні вікової фізіології людини / В.Т. Ярошенко, О.Б. Шарпан // Наукові вісті НТУУ "КПІ". - 2009. - № 1. - С. 26-29.
26. Gupta D. Bioelectrical impedance phase angle as a prognostic indicator in breast cancer / D. Gupta, C.A. Lammersfeld, P.G. Vashi et al. // BMC Cancer. - 2008. - 8. - p. 249.
27. Шарпан О. Б. Динаміка параметрів тричастотної біоімпедансометрії пацієнтів під час гемодіалітичної ультрафільтрації / О.Б. Шарпан, В.С. Мосійчук, М.О. Архипська, Б.В. Ткачук, Р.С. Томашевський // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2018. – Вип. 72. – с. 53-61.
28. Шарпан О. Б. Частотні залежності ринологічних параметрів електричного біоімпедансу в області навколосових і носових пазух // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2019. – Вип. 78, pp. 52-59.

References

- [1] Rakhmatullina L.N. and Gurevich K.Y. (2013) Application bioimpedance body composition monitor (BCm) in clinical practice in dialysis patients (literature review). *Nefrologiya*, Vol. 17, No 4, pp. 49-57.
- [2] Stokov A.G., Terekhov V.A., Poz Y.L., Kryshin K.N. and Kopylova Y.V. (2015) Persistent and Intermittent Hyperhydration in Patients on Program Haemodialysis: Methods of Evaluation and Correction. *Russian Journal of Transplantation and Artificial Organs*, Vol. 17, No 1, pp. 103-108. (In Russ.) DOI:10.15825/1995-1191-2015-1-103-108
- [3] Vishnevskii K.A., Gerasimchuk R.P. and Zemchenkov A.Y. (2014) «Dry weight» correction in hemodialysis patients based on the results of bioimpedance vector analysis. *Nephrology (Saint-Petersburg)*, Vol. 18, No 2, pp. 61-71. (In Russ.)
- [4] Piccoli A. (1998) Identification of operational clues to dry weight prescription in hemodialysis using bioimpedance vector analysis. *Kidney International*, Vol. 53, Iss. 4, pp. 1036-1043. DOI: 10.1111/j.1523-1755.1998.00843.x
- [5] Grimnes S. and Martinsen O.G. (2008) *Bioimpedance and bioelectricity basics*. Amsterdam: Elsevier, 471 p.
- [6] Tornuev Y.V., Nepomnyaschikh D.L., Nikityuk D.B., Lapiy G.A., Molodykh O.P., Nepomnyaschikh R.D., Koldysheva E.V., Krinitsyna Y.M., Balakhnin S.M., Manvelidze R.A., Semenov D.E. and Churin B.V. (2014) Diagnostic capability of noninvasive bioimpedance. *Fundamental Research*, No. 10, pp. 782-788.
- [7] Kyung-Wan Baek, Ji-Seok Kim, Jin Sung Park, So-Jeong Kim, Yong-Chan Ha, Ok-Yi Jeong and Jun-Il Yoo (2020) Validation of Dual Energy X-Ray Absorptiometry and Nuclear Magnetic Resonance in the Analysis of Body Composition in Mice, *Journal of Bone Metabolism*, vol. 27, no. 4, pp. 291-299. DOI: 10.11005/jbm.2020.27.4.291
- [8] Nikolaev D.V., Smirnov A.V., Bobrinskaya I.G. and Rudnev S.G. (2009) *Bioimpedansnyi analiz sostava tela cheloveka* [Bioimpedance analysis of human body composition], Moscow, Nauka, 392 p.
- [9] Barni S., Fort A., Becatti M., Fiorillo C., Mugnaini M., Vignoli V., Addabbo T., Pucci N. and Novembre E. (2017) Detection of Allergen-IgE interaction in Allergic Children Through Combined Impedance and ROS Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 66, Iss. 4, pp. 616-623. DOI: 10.1109/tim.2016.2640478
- [10] Buffa R., Mereu E., Comandini O., Ibanez M. E. and Marini E. (2014) Bioelectrical impedance vector analysis (BIVA) for the assessment of two-compartment body composition', *European Journal of Clinical Nutrition*, vol. 68, no. 11, pp. 1234-1240
- [11] Dyhre-Petersen N., Köhler M. and Rasmussen H. H. (2021) Urinary creatinine based equations for estimation of fat free mass in patients with intestinal insufficiency or intestinal failure, *Clinical Nutrition ESPEN*. DOI: 10.1016/j.clnesp.2021.01.040
- [12] Matias C. N., Campa F., Santos D. A., Lukaski H., Sardinha L. B. and Silva A. M. (2021) Fat-free Mass Bioelectrical Impedance Analysis Predictive Equation for Athletes using a 4-Compartment Model, *International Journal of Sports Medicine*, vol. 42, no. 01, pp. 27-32. DOI: 10.1055/a-1179-6236
- [13] Baek K.-W., Kim J.-S., Park J. S., Kim S.-J., Ha Y.-C., Jeong O.-Y. and Yoo J.-I. (2020) Validation of Dual Energy X-Ray Absorptiometry and Nuclear Magnetic Resonance in the Analysis of Body Composition in Mice, *Journal of Bone Metabolism*, vol. 27, no. 4, pp. 291-299. DOI: 10.11005/jbm.2020.27.4.291
- [14] Sealy M. J., Dechaphunkul T., Schans C. P., Krijnen W. P., Roodenburg J.L.N., Walker J., Jager-Wittenaar H. and Baracos V. E. (2020) Low muscle mass is associated with early termination of chemotherapy related to toxicity in patients with head and neck cancer, *Clinical Nutrition*, vol. 39, no. 2, pp. 501-509. DOI: 10.1016/j.clnu.2019.02.029
- [15] Zambone M.A., Liberman S. and Bueno Garcia M.L. (2020) Anthropometry, bioimpedance and densitometry: Comparative methods for lean mass body analysis in elderly outpatients from a tertiary hospital, *Experimental Gerontology*, vol. 138, p. 111020. DOI: 10.1016/j.exger.2020.111020
- [16] Tseytlin G.Ya., Vashura A.Yu., Konovalova M.V., Balashov D.N., Maschan M.A. and Belmer S.V. (2013) Value of bioimpedance analysis and anthropometry for complication prediction in children with malignant and non-malignant diseases after hematopoietic stem cells transplantation. *Oncohematology*, Vol. 8, No 3, pp. 48-54. DOI: 10.17650/1818-8346-2013-8-3-48-54
- [17] Amaroa P. P., Hidalgo P. P., Gómezb V. G. and Moyac J.M.G. (2020) Déficit nutricional relacionado con la enfermedad renal Nutritional deficit related to kidney disease *Journal of Bone Metabolism*, Vol. 27(4), pp. 291-299.
- [18] Walter-Kroker A., Kroker A., Mattiucci-Guehlke M. and Glaab T. (2011) A practical guide to bioelectrical impedance analysis using the example of chronic obstructive pulmonary disease. *Nutrition Journal*, Vol. 10, Iss. 1. DOI: 10.1186/1475-2891-10-35
- [19] Fassini P. G., Nicoletti C. F., Pfrimer K., Nonino C. B., Marchini J. S. and Ferrioli E. (2017) Bioelectrical impedance vector analysis as a useful predictor of nutritional status in patients with short bowel syndrome, *Clinical Nutrition*, vol. 36, no. 4, pp. 1117-1121. DOI: 10.1016/j.clnu.2016.07.011
- [20] Sharpan O. B., Mosiychuk V. S. (2017) Dynamics of frequency dependences of parameters of electric impedance of a person during dry fasting, *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparatobuduвання*, Iss. 70, pp. 43-48. doi: 10.20535/RADAP.2017.70.43-48.
- [21] Marta Carrasco-Marginet, Jorge Castizo-Olier, Lara Rodríguez-Zamora, Xavier Iglesias, Ferran A. Rodríguez, Diego Chaverri, Daniel Brotons and Alfredo Iurtia (2017) Bioelectrical impedance vector analysis (BIVA) for measuring the hydration status in young elite synchronized swimmers', *PLOS ONE*, vol. 12, no. 6, p. e0178819. DOI: 10.1371/journal.pone.0178819
- [22] Paterno A., Hermann L. and Bertemes-Filho P. (2012) Efficient Computational Techniques in Bioimpedance Spectroscopy. *Applied Biological Engineering - Principles and Practice*. DOI: 10.5772/36307
- [23] Colín-Ramírez E., Castillo-Martínez L., Orea-Tejeda A., Vázquez-Durán M., Rodríguez A.E. and Keirns-Davis C. (2012) Bioelectrical impedance phase angle as a prognostic marker in chronic heart failure. *Nutrition*, Vol. 28, Iss. 9, pp. 901-905. DOI: 10.1016/j.nut.2011.11.033
- [24] Santarpia L., Marra M., Montagnese C., Alfonsi L., Pasanisi F. and Contaldo F. (2009) Prognostic significance of bioelectrical impedance phase angle in advanced cancer:

- Preliminary observations. *Nutrition*, Vol. 25, Iss. 9, pp. 930-931. DOI: 10.1016/j.nut.2009.01.015
- [25] Yaroshenko V.T. and Sharpan O.B. (2009) Bioimpedance Variants in Studies of Human Age Physiology, *Naukovi visti NTUU KPI*, No 1, pp. 26-29. (in Ukrainian)
- [26] Gupta D., Lammersfeld C.A., Vashi P.G., King J., Dahlk S.L., Grutsch J.F. and Lis C.G. (2008) Bioelectrical impedance phase angle as a prognostic indicator in breast cancer. *BMC Cancer*, Vol. 8, Iss. 1. DOI: 10.1186/1471-2407-8-249
- [27] Sharpan, O. B., Mosiychuk, V. S., Arkhypska, M. O., Tkachuk, B. V. i Tomashevskiy, R. S. (2018) Dynamics of Bioimpedance Parameters on Three Frequencies During Ultrafiltration. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Iss. 72, pp. 53-61. DOI: 10.20535/RADAP.2018.72.53-61.
- [28] Sharpan O. B. and Mosiychuk V.S. (2019) Frequency Dependences of the Rhinological Parameters of Electrical Bioimpedance in the Area of the Paranasal and Nasal Sinuses, *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Iss. 78, pp. 52-59. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.52-59.

Облачный сервис визуального мониторинга динамики функционального состояния пациента по параметрам электрического биоимпеданса

Мосийчук В. С., Шарпан О. В.

Представлены результаты разработки собственного облачного сервиса и гибкого веб-интерфейса системы электрической биоимпедансометрии, которая используется в задачах диагностики состава тела и его биогидратности. Система обеспечивает организацию и удобный оперативный контроль протекания диагностической или лечебной процедуры на основе непосредственного определения и динамики составляющих параметров электрического биоимпеданса (модуля, фазового угла, активной и реактивной составляющих) в расширенной полосе частот. Особенности и условия реализации такой системы рассмотрены на примере задачи диагностики динамики водного статуса человека непосредственно в течение сеанса ультрафильтрации во время процедуры гемодиализа. В этом случае структура объединяет в единую систему аппарат "искусственной почки", биоимпедансометр и облачный сервис с обработкой и отображением входных данных. Измерение параметров электрического биоимпеданса осуществляются на трех фиксированных частотах 20 кГц, 100 кГц и 500 кГц в автоматическом режиме в течение всего сеанса ультрафильтрации. Полученные данные во время измерений отображаются в веб-интерфейсе. Как диагностические показатели применяются указанные параметры импеданса, а также положение векторов импеданса

на комплексной плоскости относительно "эллипсов толерантности". Ориентируясь на динамические изменения параметров биоимпеданса можно объективно оценивать динамическое функциональное состояние пациента и корректировать прохождения любой лечебной процедуры.

Ключевые слова: электрический биоимпеданс, мониторинг, функциональное состояние, контроль состава тела, эллипсы толерантности, гемодиализ, ультрафильтрация, веб-интерфейс

Cloud-based service for visual monitoring of the patient's functional state dynamics using the electrical bioimpedance parameters

Mosiychuk V. S., Sharpan O. B.

Background/Aim. The results of the development of its own cloud service and a flexible web interface of the electrical bioimpedance measurement system are presented.

The purpose of this article is to investigate and describe additional cloud service which is possible to use in the problems of diagnosing body composition and its biohydration. The system provides the organization and convenient operational control of the diagnostic or therapeutic procedure based on the direct determination and dynamics of the constituent parameters of the electrical bioimpedance (module, phase angle, active and reactive components) in an extended frequency band.

System implementation. The features and conditions for the implementation of such a system are considered on the example of the problem of diagnosing the dynamics of the water status of a person directly during an ultrafiltration session of the hemodialysis procedure. In this case, the structure combines an "artificial kidney" apparatus, a bioimpedance meter and a cloud service with processing and display of input data into a single system.

Accumulation and analysis of clinical data. Measurement of electrical bioimpedance parameters is carried out at three fixed frequencies of 20 kHz, 100 kHz and 500 kHz in automatic mode during the entire ultrafiltration session. The data obtained through API during measurements is displayed in the web interface.

Discussion and Conclusion. The indicated impedance parameters are used as diagnostic indicators, as well as the position of the impedance vectors on the complex plane relative to the "tolerance ellipses". Focusing on the dynamic changes in bioimpedance parameters, it is possible to objectively assess the functional state dynamic of the patient and correctness of any treatment procedure.

Key words: electrical bioimpedance, monitoring, functional state, body composition control, tolerance ellipses, hemodialysis, ultrafiltration, web interface