

PHYSICS OF DEVICES, ELEMENTS AND SYSTEMS ФІЗИКА ПРИЛАДІВ, ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

УДК 615.844

DOI:10.30837/rt.2024.3.218.11

О.М. ЗІНЧЕНКО, В.П. ОЛІЙНИК, канд. техн. наук, П.М. ПОДПРУЖНИКОВ

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТИКИ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Вступ

Під терміном «діагностика» розуміють процес визначення стану об'єкта дослідження. Результатом діагностики є комплекс якісних і кількісних показників, що дозволяють класифікувати стан об'єкта. У більшості практичних застосувань діагностику пов'язують з об'єктом, стан якого визначається. До поширених видів діагностики належить медична діагностика – комплекс заходів та досліджень, спрямованих на встановлення діагнозу, тобто точної причини захворювання людини, а також змін внутрішнього середовища організму та супутніх захворювань, та призначення ефективного лікування захворювання. Також у сучасній інженерії використовують технічну діагностику – комплекс робіт контролю технічного стану об'єкта. Виконується, в основному, з використанням відповідних методів та засобів виміральної техніки. Технічний огляд проводиться у терміни та у випадках, визначених нормативно-правовими актами з охорони праці, організаційно-методичними та експлуатаційними документами [1].

Відповідно до приведених визначень, як для об'єктів живої, так і неживої природи діагностика базується на методі дослідження і засобах його реалізації. Минуло майже три чверті століття як було зареєстровано авторство на метод дослідження, який у науковій термінології отримав назву «Ефект Кірліан» [2]. Він полягає в отриманні зображень випромінювання газового розряду довкола об'єкта дослідження, що знаходиться в змінному електричному полі великої напруженості. У разі, коли об'єктом є живі організми або біологічні структури, використовують назви цього методу – «Кірліан-діагностика» та «Біоелектрографія». Основна діагностична ідея методу – це зв'язок світіння електричного розряду в оточуючому атмосферному повітрі з електрофізичними властивостями внутрішніх та поверхневих структур об'єкта, які у свою чергу інтерпретуються медико-біологічними показниками для живих організмів, або технічними характеристиками для неживих структур [3]. Важливою особливістю цього методу є аналіз не власного зображення об'єкту, а переважно випромінювання оптичного діапазону електромагнітних хвиль, що виникає внаслідок розрядних процесів. Тому можна вважати, що термін «газорозрядна візуалізація» (ГРВ) є коректним для аналізу всіх практичних реалізацій цього методу.

Засоби газорозрядної візуалізації були створені для наукових та прикладних досліджень біологічних, небіологічних об'єктів, стану навколишнього середовища. За допомогою цих засобів можна проводити діагностику організму людини, вивчати рідини та тверді речовини органічного та неорганічного походження (кров, вода, рослинні культури, мінерали тощо) [4]. До недоліків методу відносять залежність інформативних показників зображень не тільки від властивостей об'єкта, а і сталості параметрів оточуючого середовища. Відсутні єдині метрологічні вимоги до технічних засобів ГРВ, що стримує їх практичне застосування.

Метод ГРВ завжди привертав увагу науковців завдяки своїм діагностичним можливостям. Тому об'єктом дослідження в цій роботі є метод газорозрядної візуалізації, предметом – технічні засоби його реалізації.

Мета дослідження – пошук технічних рішень побудови засобів газорозрядної візуалізації для досягнення потенціальних можливостей їх практичного застосування. Для досягнення мети поставлені такі задачі: провести аналіз фізичних та технічних положень газорозрядної

візуалізації; розглянути структуру існуючих засобів ГРВ; визначити перспективні напрями використання ГРВ-засобів та запропонувати шляхи їх модернізації та удосконалення.

Фізичні та технічні основи методу газорозрядної візуалізації

Опубліковано велику кількість робіт, що розглядають фізичні процеси формування ГРВ зображень [5–7]. На етапі розробки нових та модифікації вже наявних засобів газорозрядної візуалізації дуже важливим стає однакова наукова термінологія при плануванні, проведенні та описі результатів діагностики, а також сама назва методу має відображати сутність фізичних процесів.

На сьогодні у світі розроблено сотні практичних модифікацій засобів ГРВ залежно від геометричної форми, параметрів та фізичних властивостей досліджуваних об'єктів живої та неживої природи. При всьому різноманітті конкретних технічних рішень сутність процесу візуалізації у всіх цих модифікаціях однакова і може бути зведена до загальної послідовності процесів.

Газовий розряд виникає в системі, що складається з об'єкта дослідження, носія зображення та електродів, що формують електромагнітне поле (ЕМП). Первинним процесом є взаємодія ЕМП з об'єктом дослідження, ініціювання початкових фаз газового розряду за певної напруженості ЕМП, виникнення емісії заряджених частинок з поверхні об'єкта, що беруть участь у підтримці розряду. Для пояснення деяких кількісних характеристик розрядного процесу використовуємо узагальнену будову засобів ГРВ, показано на рис. 1.

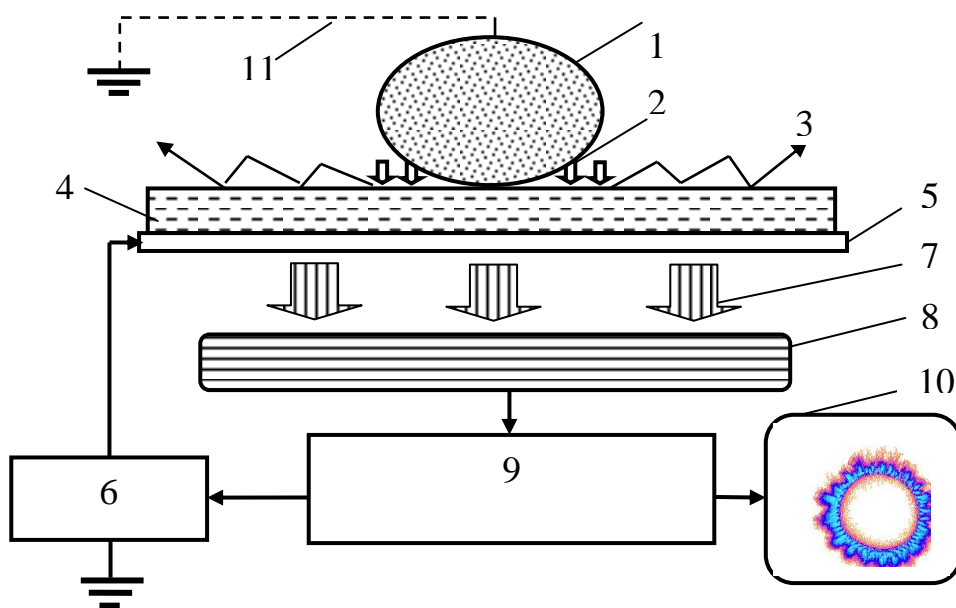


Рис. 1. Структурні елементи засобів газорозрядної візуалізації:

1 – об'єкт діагностики; 2 – лавинний пробій; 3 – ковзний розряд;

4 – прозора діелектрична основа; 5 – прозора провідникова плівка; 6 – джерело високовольтної імпульсної напруги; 7 – світіння в оптичному діапазоні випромінювання; 8 – відеоперетворювач; 9 – комп'ютерний пристрій керування та оброблення інформації; 10 – ГРВ- зображення на моніторі; 11 – коло розрядних струмів

Основне джерело формування зображення – це газовий розряд поблизу поверхні об'єкта, що досліджується. Експериментальні дослідження показали, що можна виділити два основні типи розряду, пов'язані з формуванням газорозрядних зображень: лавинний, що розвивається в обмеженому діелектриком вузькому зазорі, та ковзний на поверхні діелектрика [5–7]. У ході розвитку лавини безупинно збільшується число електронів і позитивних іонів. Із збільшенням числа електронів у голівці лавини зростає напруженість на фронті лавини. Відбувається перехід лавинного розряду в стримерний. Стример являє собою слабоіонізо-

ванний тонкий канал, що світиться, який утворюється в результаті злиття електронних лавин (лавинно-стрімерний перехід). Фотони, що виникають у процесі розряду, формують двовимірну картину на носії зображення. Газовий розряд також може впливати на стан об'єкта, викликаючи вторинні емісійні, деструктивні та теплові процеси.

У більшості сучасних реалізацій засобів ГРВ об'єкт діагностики розташовується на сенсорі, що складається з прозорої діелектричної основи (скло, кварцове скло), на зворотню сторону якого напилена прозора провідникова плівка (оксид олова). Джерело високовольтної імпульсної напруги створює напруженість електричного поля достатню для лавинного пробою та ковзного розряду. Коло розрядних струмів має в основному ємнісний характер, але для деяких об'єктів використовують додатковий контакт з «нульовим» потенціалом для збільшення напруженості електричного поля. Випромінювання розряду реєструє відеоперетворювач. У випадку, коли реєстрація світіння відбувається на фотоматеріалі (фотоплівка, фотопапір) з наступною хімічною обробкою, поширено використання назви «кірліанограма». На сучасному етапі побудови засобів ГРВ діагностики функцію відеоперетворювача виконують матричні цифрові камери, доповнені оптичною системою. З відеокамери цифрове зображення світіння розряду подається на пристрій керування процесом візуалізації і після оброблення виводиться на монітор користувача.

Розглянуті технічні рішення реалізовані у програмно-апаратних ГРВ комплексах. Використання RISC мікроконтролера дозволяє проводити управління приладом та обирати робочі параметри від ПК, синхронізувати роботу всіх блоків, а також налаштовувати параметри приладу при проведенні контролю обладнання. Програмована затримка запису відеосигналу по відношенню до поданого імпульсу напруги дозволяє відстежувати динаміку реакції біологічного об'єкта на імпульс збудження.

Більшість ГРВ комплексів мають наступні технічні параметри: амплітуда біполярних імпульсів від 3 до 20 кВ з плавним або ступінчастим регулюванням; тривалість імпульсів 10 мкс; частота проходження імпульсів до 1000 Гц; встановлення часу експозиції у діапазоні 0,1...32 с; здійснення двостороннього зв'язку з комп'ютером за допомогою USB порту, що дозволяє як передавати інформацію (команди) у прилад, так і здійснювати діагностику режимів роботи приладу; кварцова стабілізація всіх параметрів з точністю не гірше 1 %.

У ГРВ засобах для створення електричного поля розряду використовують серію біполярних імпульсів напруги. При кожній полярності імпульсу виникає відповідна фаза розряду, і остаточна картина являє собою суперпозицію зображень від позитивного та негативного розрядів (з урахуванням спотворення електричного поля позитивним поверхневим зарядом, що залишилися після попередніх розрядів). Для ГРВ використовується лише лавинна фаза цього розряду на низькому струмі, при якій інтегральна величина струму в імпульсі не перевищує 50 мА [4, 5].

Для виявлення інформаційної ваги різних компонентів оптичного випромінювання було проведено велику серію робіт з експериментального дослідження спектру світіння різних об'єктів у процесі ГРВ [4]. Інтерес до цього питання стимулювався численними роботами з «ефекту Кірліан», у яких було зазначено, що на кольорових фотографіях світіння спостерігається спектр кольорів, що закономірно залежать від стану досліджуваного об'єкт. У зв'язку з коротким часом розвитку розряду, дослідження цього спектра є складною технічною задачею, при вирішенні якої були використані оптичні фільтри, спектрографи та імпульсні спектрометри. Було встановлено, що спектр випромінювання ГРВ розряду в повітрі переважно займає область від 150 до 800 нм, найбільш активна частина спектру складається в основному з молекулярних смуг другої позитивної системи азоту, а також містить лінії CO, CO₂ та O₂, що зазвичай спостерігається у розряді з невеликим струмом в повітряному середовищі. Основна область спектру випромінювання знаходиться в діапазоні 280...800 нм. У електропозитивних газах (повітря, азот, водень та ін.) вид газорозрядних фігур якісно ідентичний, тоді як введення електронегативних добавок (наприклад, CCl₄) викликає кардинальну зміну всієї фігури: різке зменшення розміру та придушення «тонкої структури» зображення.

Це пов'язано з трьома основними процесами: поглинанням повільних електронів, що перешкоджає розвитку електронних лавин; поглинанням вторинних електронів, народжених у лавині; спотворенням електричного поля за рахунок негативних іонів.

Як показують експерименти, практично в основі всіх випромінювань тканин організму у видимій та ультрафіолетовій областях спектру лежить той чи інший різновид люмінесценції. У процесі ГРВ може виникати люмінесценція, індукована різними фізичними факторами: ультрафіолетовим та видимим випромінюванням – фотолюмінесценція; іонізуючим випромінюванням – радіолюмінесценція; електричним струмом – електролюмінесценція; хімічними реакціями – хемілюмінесценція.

Як впливає з досліджень, надслабке світіння у видимій та ультрафіолетовій області за певних умов може робити внесок у процеси ГРВ за рахунок фотоіонізації та ініціації електронних лавин [5, 6].

Основні інформативні показники, що визначаються за газорозрядними зображеннями

Цільовим інформаційним джерелом методу ГРВ є ГРВ-грама. ГРВ-грама – це одиничне зображення газового розряду, зафіксованого в будь-який момент часу експозиції електромагнітного поля в області об'єкта [6]. Іноді, ГРВ-граму називають «аурою» об'єкта. На рис. 2 показано ГРВ-грами різних об'єктів, отримані в роботі [8].

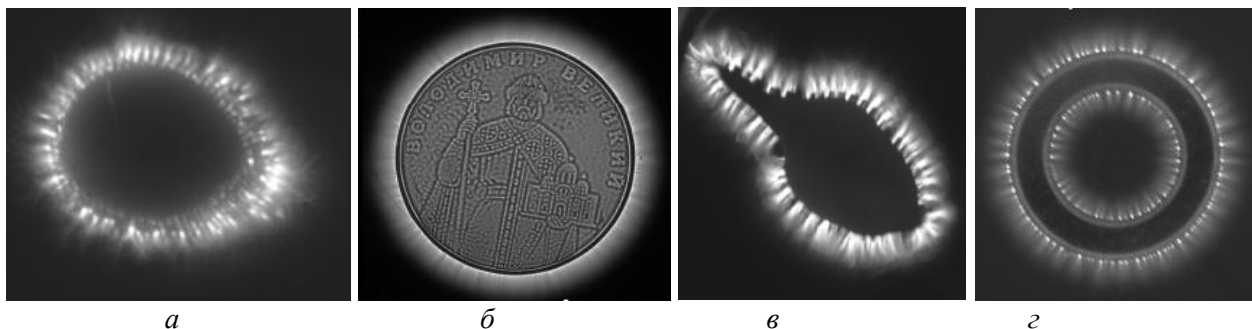


Рис. 2. ГРВ-грами: *a* – вказівного пальця людини, *б* – металеві монети, *в* – краплі води, *г* – феритового кільця

Поверхневі ГРВ-грами досить складні, тому для виявлення інформації про досліджуванний об'єкт необхідно виявити параметри розряду, які необхідно оцінити [5]. До них відносять:

- параметри, що характеризують розрядні стримери: довжина, кількість, ступінь розгалуження;
- параметри, що характеризують форму газорозрядної фігури: радіус, загальна площа, симетрія, фрактальна розмірність та інші;
- інтегральний струм розряду в різних частотних діапазонах;
- інтегральна інтенсивність світіння розряду;
- спектральний склад випромінювання [9, 10].

При цьому стримером вважається суперпозиція в часі окремих коронних стримерів на півперіодах змінної напруги, тобто інтегральна картина світіння окремих коронних стримерів, що чергуються [11].

Недоліком таких досліджень є неможливість встановлення ідентичності отриманих зображень у різних дослідах, оскільки це пов'язано зі зміною параметрів напруги, частоти, стану атмосфери, часу експозиції фотокамери, енергії виходу з об'єкта, наявності на поверхні забруднень, нерівностей країв об'єктів та його шорсткості, з дією розряду на сам об'єкт тощо.

У ГРВ-грамі інформація про об'єкт проявляється в параметрах зображення за рахунок впливу об'єкта на такі характеристики розряду: інтенсивність світіння, тривалість, частоту проходження і просторовий розподіл окремих лавинних актів, а також спектральний склад випромінювання. Як основні джерела інформативних ознак об'єктів можна виділити такі:

- фактори, що викликають розподіл електричного поля в розрядному зазорі (наприклад, неоднорідність структури поверхні або об'єму), оскільки при однаковій концентрації ініціювальних частинок лавинні розряди виникають переважно в областях з максимальною напруженістю електричного поля і розвиваються більш інтенсивно у порівнянні з сусідніми областями;

- просторова або часова неоднорідність емісійних властивостей поверхні об'єкта, оскільки від цього залежить як величина струму розряду, так і частота проходження розрядів;

- просторова або часова неоднорідність власного газовиділення (або випаровування) поверхні об'єкта, тому що вона впливає на склад газового середовища в зазорі, а отже, на інтенсивність розряду і спектральний склад випромінювання;

- неоднорідність поверхні об'єкта щодо електропровідності або її зміни в часі, оскільки від цього залежить інтенсивність окремих актів розряду та частота їх проходження;

- загальний імпеданс електричного кола, що залежить, при сталості інших параметрів, від електричних властивостей досліджуваного об'єкта, його поверхні та об'єму.

Аналітичні моделі в сукупності з експериментальними даними робіт [9, 10, 12] дозволили зробити висновки, щодо забезпечення інформативності при практичній реалізації методу ГРВ:

- характер фізичних процесів в рамках одиничного акту розряду практично не залежить від форми напруги, що подається (синусоїдального або імпульсного), а визначається перерозподілом електричного поля в розрядному зазорі завдяки накопиченню поверхневого заряду на обмежувальних електродах і досліджуваному об'єкті;

- оптимальним є використання послідовності коротких імпульсів напруги. Зіставлення ГРВ-грам, отриманих при різній тривалості імпульсів T_U , показало, що найкраща якість виявлення металевих включень у товщі діелектрика спостерігається при $5 \text{ мкс} < T_U < 15 \text{ мкс}$;

- математичний аналіз теплових процесів на поверхні біооб'єкта в умовах отримання ГРВ біоелектрограм показує, що при характерному часі впливу $\sim 10^{-5} \text{ с}$ потужність в розряді виявляється недостатньою для помітного температурного впливу на об'єкт. Це свідчить про неруйнівний характер діагностики.

У роботі [13] запропоновано безрозмірні показники для оцінювання ГРВ зображення: відношення внутрішньої площі аури до площі досліджуваного об'єкта; зовнішньої площі аури до площі об'єкта; відношення різниці площ внутрішньої і зовнішньої аур до загальної площі аури; відношення різниці площ внутрішньої і зовнішньої аур до площі об'єкта; відношення кількості елементів, що входять до внутрішньої і зовнішньої аур відповідно.

Більшість основних інформативних ознак зображень ГРВ ґрунтуються на аналізі цілого зображення, а не окремих елементів, таких як стримери. Таким чином, інформативні параметри, що можна встановити з аналізу зображень стримерів, недостатньо вивчені та потребують подальших досліджень.

Структура технічних засобів газорозрядної візуалізації

При розгляді різноманіття відомих технічних рішень побудови засобів газорозрядної візуалізації оберемо певні структурні ознаки. Базовою умовою візуалізації є забезпечення напруженості електричного поля достатньої для розряду у повітрі, тому до першої групи ознак віднесемо фізико-технічні властивості які приведені у табл. 1.

Фізичні та технічні рішення використані для побудови засобів ГРВ

Формування напруженості електричного поля розряду	Елементи сенсорного пристрою	Спосіб реєстрації зображення	Спектральні характеристики випромінювання, що реєструється	Динамічні характеристики зображення
Джерело постійної напруги 3...100 кВ	Двоелектродний: провідник – об'єкт – діелектрик – провідник	Переважно фотоматеріали (фото та рентгенівські плівки, папір, пластини)	Ультрафіолетове, видиме, ближнє інфрачервоне випромінювання, потоки електронів, іонів	Статичні зображення, інтегральна візуалізація визначається тривалістю експозиції
Генератор змінної напруги синусоїдальної форми, амплітуда до 30 кВ, діапазон частот 0,05...200 кГц	Двоелектродний: провідник – об'єкт – прозорий діелектрик – прозорий провідник; або Одноелектродний: об'єкт – прозорий діелектрик – прозорий провідник	Переважно фотоматеріали (фото та рентгенівські плівки, папір, пластини)	Ультрафіолетове, видиме, ближнє інфрачервоне випромінювання, потоки електронів, іонів	Статичні зображення, інтегральна візуалізація визначається тривалістю експозиції
Генератор імпульсної напруги, амплітуда до 25 кВ, частота повторення імпульсів 0,1...500 кГц, тривалість імпульсів більше 1 мкс		Телевізійна відеокамера	Видиме випромінювання	25 кадрів (50 полів) за секунду, стандартний TV-сигнал
		Цифрова відеокамера	Видиме, ближнє інфрачервоне випромінювання	Синхронізація з тривалістю експозиції, максимальна кількість кадрів – 100 за секунду (задається програмно)

При порівнянні двох способів реєстрації – фотоплівка або цифрова камера вибір залежить від того, яке завдання вирішується.

Роздільна здатність фотопаперу становить 300 ліній/мм. Це означає, що при реєстрації зображення світіння на фотопапері шириною 10 см буде розрізнятися 30000 елементів. Сучасні цифрові камери мають до 3000 пікселів у рядку. Значить, якщо за допомогою оптичної системи спректувати таке ж за розмірами світіння на приймальну матрицю відеокамери, то маємо програш у роздільності в 10 разів. Тому цифрові камери для досягнення високої роздільної здатності обмежують поле зору до 25 мм.

Принципова відмінність у використанні фотоматеріалів від цифрової камери або телекамери полягає в тому, що відеокамери здійснюють реєстрацію тільки фотонів видимої частини спектру світіння розряду. Фотоматеріали реєструють ширший спектр випромінювання фотонів, потік іонів і потік неелектромагнітного випромінювання. За допомогою фотоматеріалів можна реєструвати процес світіння з непрозорими електродами сенсору, чого неможливо зареєструвати за допомогою відеокамер.

Реєстрація на фотоматеріали ефективніша для реєстрації тонких енергопольових ефектів з високою роздільною здатністю. Недоліки: трудомісткий і тривалий процес хімічного оброблення зображень.

Реєстрація за допомогою відеокамери має велику оперативність і можливість відразу отримувати результат. За рахунок усереднення розрядів від багатьох імпульсів формується зображення що добре відображає загальний стан об'єкта діагностики.

Зважаючи на те, що у науковій термінології для методу газорозрядної візуалізації ХХ та початку ХХІ сторіччя затвердився термін «ефект Кірліан» технічні засоби мали назву «Кірліан камера». У більшості цих зразків реєстрація зображення відбувалась на фотоматеріалі. На рис. 3 показана кірліан-камера з реєстрацією на кольоровий фотопапір [14].



Рис. 3. Кірліан-камера Modelo K200 розробки Рауля Тореса (Аргентина, 2000 – 2005 р.)

Відомо досить багато конструкцій Кірліан-камер, побудованих за цим способом реєстрації в різних країнах світу (Аргентина, Бразилія, Великобританія, Італія, Іспанія, Німеччина, СРСР, США та ін.) [14]. Переважна більшість цих засобів спрямована на дослідження фізіологічного стану людини або окремих патологій за зображеннями світіння газового розряду довкола пальців кінцівок. Це були авторські розробки науковців і дослідників, виготовлені в одиничних або декількох екземплярах.

Суттєві зміни у конструкціях засобів газорозрядної діагностики пов'язані з комп'ютеризацією електроніки і цифровими технологіями оброблення інформації. Поширення персональних комп'ютерів, удосконалення програмного забезпечення та використання цифрових відеокamer забезпечило створення ГРВ апаратно-програмних комплексів. Сучасні розробки мають ГРВ-камеру, що через стандартний USB інтерфейс під'єднується до персонального комп'ютера (ноутбука, планшета). Первинне світіння розряду реєструється цифровою відеокamerою і відображається на моніторі ПК. Відібрані первинні зображення обробляються в ПК за програмним алгоритмом, який визначає необхідні діагностичні показники.

ГРВ обладнання, що набуло поширення в різних напрямках дослідницької діяльності, представлено лінійкою ГРВ приладів [3, 15], їх основні технічні характеристики наведено в табл. 2. Також випускаються допоміжні засоби для дослідження об'єктів навколишнього середовища, що входять в комплектацію набору «ГРВ мінілабораторій». Прилад «ГРВ Експрес» призначений для одночасного зняття ГРВ-грам десяти пальців рук людини.

У 2014 р. розроблено та запущено у виробництво наступне покоління ГРВ приладів «Біо-Велл» з обробкою інформації в Інтернет просторі, що зумовило новий етап у розвитку біоелектрографії [6, 14]. Програмно-апаратний комплекс «Біо-Велл» дозволяє отримані ГРВ-грами зберігати на сервері, де відбувається обробка даних за допомогою аналітичного програмного забезпечення, заснованого на використанні методів обробки зображень, штучного інтелекту та математичного аналізу великих баз даних. Програми, що базуються на більш ніж 30000 вимірюваннях, формують висновки, отримані з порівняння ГРВ-грами випробуваного із усередненими діапазонами величин, притаманними здоровим людям. Автоматична обробка даних дозволяє одночасно обробляти ГРВ-грами кількох випробуваних з можливістю порівняння кількох серій зйомок (наприклад, зроблених у різні дні, до та після різних впливів на організм випробуваного). Ці дані доступні у вигляді графіків чи числових таблиць. Програма також дозволяє розрахувати коефіцієнт, що характеризує рівень стресу.

Порівняльні характеристики приладів ГРВ

Функції та характеристики	ГРВ Міні	ГРВ Компакт	ГРВ Камера	ГРВ Експрес
				
Діагностика людини	По 1 пальцю	По 1 пальцю	По 1 пальцю	Одночасно 10 пальців
Дослідження речовин	Немає	Тільки вода (за допомогою додаткового пристрою)	Різні речовини (за допомогою ГРВ міні-лабораторії)	Немає
Кількість режимів напруги	1	1	4	1
Амплітуда напруги, кВ	Інформація відсутня	До 5	До 5	Інформація відсутня
Тривалість одиночного імпульсу, мкс	Інформація відсутня	Інформація відсутня	10	Інформація відсутня
Частота послідовності імпульсів, Гц	Інформація відсутня	1024	900–1100	Інформація відсутня
Тривалість автоматичної експозиції, с	Інформація відсутня	Інформація відсутня	0,5/1,0/2,0/32	Інформація відсутня
Вхідний сигнал на пристрій автоматичної обробки	Інформація відсутня	Інформація відсутня	Цифровий відеосигнал в стандарті СУХ 4:2:1	Інформація відсутня

Комплекс «Біо-Велл» має гарну відтворюваність основних характеристичних величин світіння – площі (S) та інтенсивності (I) – у серії послідовних вимірів. Для метрологічної перевірки приладу використовується титановий циліндр. Величина розбіжності між послідовними вимірами світіння титанового циліндра для площі не перевищує 5 % ($\Delta S \leq 5\%$), а для інтенсивності – 2 % ($\Delta I \leq 2\%$).

Обробка даних на сервері дозволила вирішити кілька важливих практичних завдань:

- можливість постійної модифікації програмного забезпечення та оперативний апгрейд для користувачів;
- проведення автоматичної метрологічної повірки та налаштування приладів у режим віддаленого доступу;
- захист програмного забезпечення та баз даних від вірусів та атак;
- можливість роботи на різних комп'ютерних платформах;
- зберігання всіх користувачів на сервері;
- можливість обміну даними між різними користувачами;
- можливість проведення мета-аналізу результатів різних користувачів.

Розглянуті вище пристрої потребують доставки об'єкта дослідження або його частини безпосередньо на робочу поверхню сенсора. Система газорозрядної візуалізації «Стример» має модульний принцип побудови, малі габаритні розміри, наявність виносних електронно-оптичних блоків (рис. 4) [14]. Є блок горизонтального розташування з діаметром робочого

сенсора 60 мм та три блоки типу «пістолет» з діаметрами сенсорів 10, 30 і 60 мм. Особливістю побудови системи «Стример» є розміщення високовольтного трансформатора у виносному блоці, що дозволяє збільшити довжину кабелю з'єднання блока з генератором до 1,5 – 2 м [16].

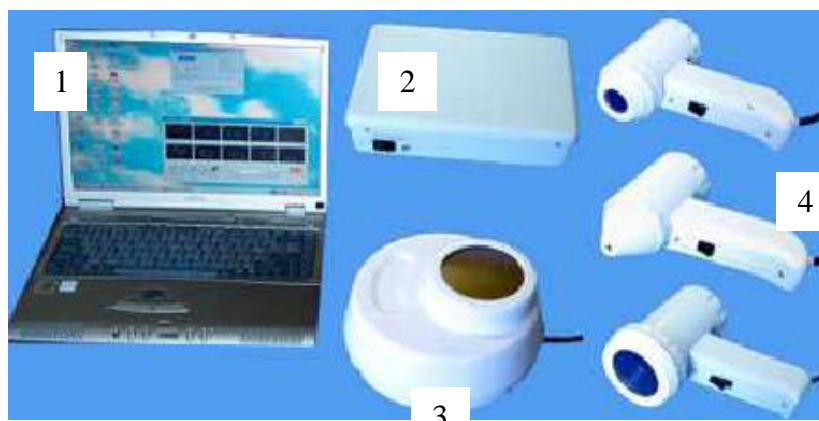


Рис. 4. Система ГРВ «Стример»: 1 – ноутбук із відкритою панеллю управління програми «GDV – Grabber 20», 2 – генератор з програмним керуванням, 3 – блок горизонтального розташування, 4 – три блоки типу «пістолет» із різними діаметрами сенсорів (10, 30, 60 мм)

Горизонтальний блок призначений для традиційної зйомки зображень пальців рук, зразків рідин, мінералів, зерен рослин та інших об'єктів. Блок «пістолет» 60 мм призначається для зйомки зображень пальців рук дорослих пацієнтів із обмеженою рухливістю суглобів. Блок «пістолет» 30 мм призначений для зйомки зображення пальців дітей дошкільного віку. Блок «пістолет» 10 мм призначений для візуалізації акупунктурних точок та впливу на них. Блоки типу «пістолет» можуть бути також використані для візуалізації ефективності терапевтичного впливу на окремі ділянки шкірного покриву людини.

В роботі [16] розглянуто ГРВ пристрій для експрес-оцінювання стану біологічного об'єкта. Технічною особливістю цього засобу є зосередження в корпусі діагностичного щупа основних блоків: сенсора, оптичної системи, цифрової камери, високовольтного генератора, елементів керування. Передача інформації та живлення щупа відбувається через кабель під'єднаний до ПК. Діагностика відбувається переміщенням сенсора щупа по поверхні об'єкта (наприклад – шкірному покриву людини).

Світіння газового розряду в повітрі довкола тестового об'єкта було застосовано для оцінювання загального екологічного стану оточуючого середовища. Структурна схема експериментальної установки приведена на рис. 5 [4].

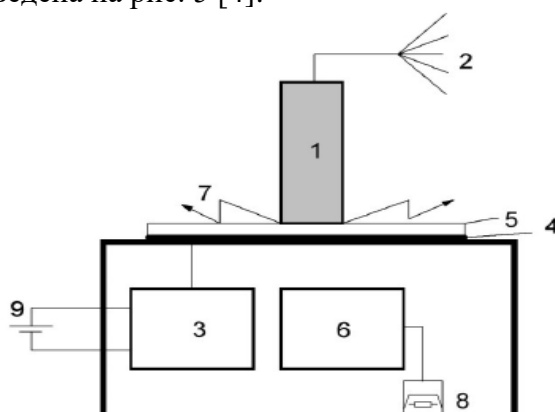


Рис. 5. Схема експериментальної установки: 1 – титановий циліндр (тестовий об'єкт); 2 – антена ГРВ-сенсора; 3 – генератор високовольтних імпульсів; 4 – прозорий струмопровідний шар; 5 – прозорий кварцовий діелектрик; 6 – відеоперетворювач; 7 – газовий розряд; 8 – USB-накопичувач; 9 – автономне джерело живлення

Розряд розвивається за рахунок струмів зміщення між антеною та заземленими або провідними об'єктами в навколишньому просторі. Залежно від наявності полів різної природи в навколишньому середовищі, хімічного складу повітря та стану провідних об'єктів (до яких належать також люди), змінюються умови поширення електромагнітної хвилі в просторі, внаслідок цього струми в системі перерозподіляються, отже, змінюються параметри світіння. Таким чином, дана експериментальна система може реагувати на зміну електричної ємності навколишнього простору та об'єктів, що знаходяться в ній. Для забезпечення розряду використовується послідовність імпульсів напруги амплітудою до 7 кВ , тривалістю 10 мкс із частотою 1 кГц , пачками $0,5 \text{ с}$, кожні $5 \dots 10 \text{ с}$.

В роботах [9, 17] запропоновано установку для дослідження рідинно-фазних біологічних об'єктів (РФБО). Відмінністю цього технічного рішення є визначення концентрацій хімічних сполук в досліджуваних рідинах по спектральним характеристикам світіння газового розряду. Структурна схема установки показана на рис. 6.

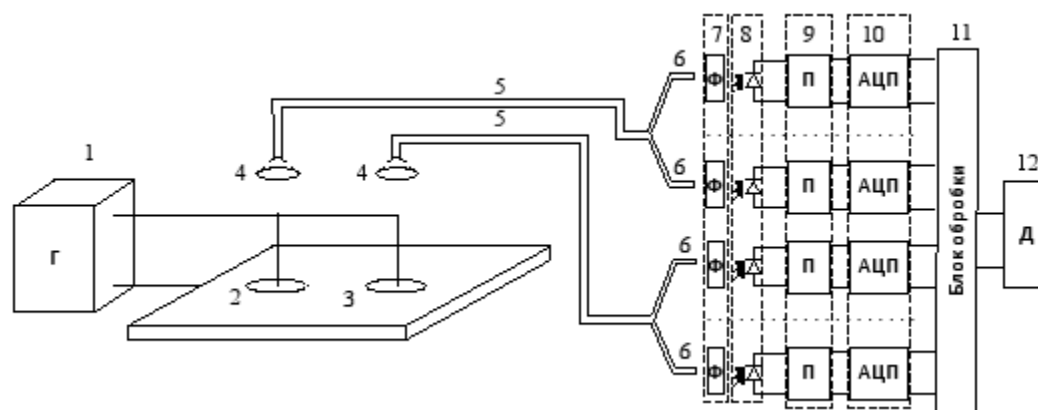


Рис. 6. Структурна схема установки дослідження спектральних складових випромінювання РФБО на основі ГРВ, де 1 – генератор високовольтної високочастотної напруги; 2 – комірка з досліджуваною рідиною; 3 – комірка зі зразковою рідиною; 4 – оптичні лінзи; 5 – багатоканальні світловоди; 6 – виходи каналів багатоканальних світловодів; 7 – світлофільтри; 8 – фотодіоди; 9 – підсилювачі; 10 – АЦП; 11 – блок обробки; 12 – дисплей [17]

Ще одним принциповим рішенням в цій установці є порівняння світіння зразкової рідини і досліджуваної. Це дає можливість частково компенсувати вплив оточуючого середовища і нестабільності вимірювального тракту на результати спектрального аналізу.

Попередньо розглянуті засоби ГРВ були переважно призначені для досліджень об'єктів біологічного походження. Але відомі також застосування методу газорозрядної візуалізації в технічній інженерії. Автором роботи [18] розроблені і впроваджені у практику пристрої (на основі ефекту Кірліан) для неруйнівного контролю матеріалів та конструкцій, що не піддаються контролю традиційними методами. В цих пристроях використовувалась реєстрація зображень на фотоматеріали, що знижувало оперативність технічної діагностики. В роботі [19] пропонується лабораторний стенд для контролю дефектів кремнієвих платин методом газорозрядної візуалізації. При подачі на електроди касети (сенсору) високочастотних імпульсів високої напруги виникає розряд, світіння якого відображає топологічні особливості об'єкту дослідження. Густина та яскравість розрядних стримерів завжди збільшена в місцях дефектів та загострень поверхні об'єкту. Оптико-електронна система у складі об'єктиву, оптичних кілець та телевізійної камери типу Novus NVC-130BH фіксує світіння розряду та перетворює його у телевізійний композитний сигнал (аналогового типу). Телевізійний сигнал надходить до входу адаптера типу Aver TV встановленого у персональний комп'ютер. Монітор ПК забезпечує виведення на екран зображення та результатів його оброблення в числовій та графічній формі.

Таким чином, можна стверджувати, що структура технічних засобів ГРВ змінювалась в залежності від удосконалення пристроїв реєстрації світіння розряду в атмосферному повітрі та потужностей комп'ютерної обробки зображень. Але електрофізичні показники виникнення розряду (амплітуда напруги, тривалість і частота імпульсів) мають експериментально перевірені інтервали.

Напрями застосування засобів газорозрядної візуалізації

Програмно-апаратні ГРВ комплекси та окремі засоби знайшли практичне застосування у наступних основних областях: медицина і біологія, спорт, дослідження рідин і матеріалів, спеціальні напрями [4].

Використання ГРВ-засобів в медицині дозволяє здійснювати: аналіз психологічного та психофізіологічного стану особистості; аналіз вегетативного статусу організму та окремих функціональних систем; моніторинг реакцій організму в процесі терапії; оцінку ймовірності наявності системних порушень роботи органів; оцінку наявності змінених станів; оцінку небезпеки алергенів за параметрами ГРВ свічення зразків крові.

Можна виділити наступні переваги застосування методу ГРВ в медико-біологічній практиці [3]:

- можливість скрінінгу і моніторингу ентропійно-енергетичного гомеостазису всього організму та його окремих систем;
- об'єктивність інформації: незалежність від бажання і досвіду конкретного користувача;
- неінвазивність, безпечність і повна стерильність, зняття інформації тільки з кінцівок пацієнта;
- можливість слідкування за розвитком процесів у часі, співставлення структурних, функціональних та часових процесів в організмі;
- методична простота і зручність: відсутність якихось особливих вимог до приміщення, умов навколишнього середовища;
- використання сучасних методів нелінійної математики для обробки фрактальних зображень і вибору інформації про стан пацієнта;
- наочність та можливість інтерпретації отриманих результатів, зручність їх зберігання та обробки.

Для спортивної діяльності ГРВ-засоби дозволяють: проводити динамічне визначення психофізичного потенціалу спортсмена з метою оперативного контролю рівня функціональних резервів та якості здоров'я в ході навчально-тренувального процесу; забезпечувати експрес діагностику стресостійкості та якості процесів ментальної та психоенергетичної мобілізації з метою прогнозу успішності змагальної діяльності; проводити диференційовану рейтингову оцінку психофізичного потенціалу обстежуваного контингенту спортсменів з метою відбору, підготовки та своєчасної корекції тренувального процесу.

Для дослідження рідиннофазних об'єктів ГРВ-засоби використовують за такими напрямками: діагностика по зразкам біологічних рідин (кров, сеча, слина, мокроти, слези, спинномозкова рідина та інші) [6]; виявлення відмінності натуральних та синтетичних масел; оцінка якості косметичних препаратів; дослідження гомеопатичних препаратів.

Неруйнівна дефектоскопія матеріалів і конструкцій засобами ГРВ дозволяє оцінювати структурні неоднорідності діелектричних, напівпровідникових, композитних сполук [21]; властивості зразків дорогоцінного каміння [4]; герметичність зварних механічних конструкцій [18].

Такий широкий спектр застосувань засобів ГРВ обумовлений високою чутливістю до змін емісійних параметрів досліджуваного об'єкта, поміщеного в електромагнітне поле високої напруженості, та застосовуваних методів обробки інформації з урахуванням сучасних теоретичних підходів та методів штучного інтелекту. Прикладами спеціальних напрямів

використання засобів ГРВ є дослідження геоактивних зон та їх впливу на людину, загального екологічного стану довкілля, діагностування стресових станів людини.

Наукові публікації останнього десятиріччя, що пов'язані з методами та засобами газорозрядної візуалізації, були спрямовані на доказовість їх застосування в медичній діагностиці. Автори роботи [20] досліджували методом ГРВ вплив енергетичного стану людини на структуру зразків води. В роботах [21, 22] доведена висока кореляція діагностичних показників ГРВ з показниками ЕКГ, ЕЕГ та акупунктурної діагностики. Дослідження виконані з застосуванням пристрою «GDV Chamber».

У роботі [23] наведені результати систематичного пошуку у дослідницьких базах даних, таких як Google Scholar, PubMed і PsychINFO використання ГРВ за період 2000 – 2022 рр. в англomовних виданнях. Зазначено, що ГРВ має потенціал для ранньої діагностики порушень роботи ендокринної та імунної систем. Рекомендується застосування засобів ГРВ для оцінювання самопочуття здорових людей, спостереження за ефектами впливу процедур, таких як йога, медитація, акупунктура, цигун, музикотерапія, масаж на енергетику систем людини.

Цікавими є початкові результати досліджень за проектом «Функціональні зв'язки між параметрами точок акупунктури та нейро-ендокринно-імунною мережею» наведені в роботі [24]. За допомогою ГРВ-засобів зареєстровано зв'язок електропровідності точок акупунктури з особливостями нейро-ендокринно-імунної мережі організму пацієнта. Ці результати є спробою узгодити парадигми західної та східної медицини.

Ще одне перспективне використання ГРВ-засобів полягає в реєстрації біофотонного випромінювання живих організмів, відмічене в роботі [25]. Дійсно, в живих організмах на клітинному рівні відбувається безліч біофізичних процесів в результаті обміну речовин. Ці процеси супроводжуються надслабким широкосмуговим електромагнітним випромінюванням. Фотонна компонента сягає від інфрачервоного до ультрафіолетового та гамма-випромінювань. Фотони цих випромінювань можуть впливати як на виникнення газового розряду довкола об'єкта дослідження, так і на спектральні характеристики його світіння.

Варіанти технічних рішень для засобів ГРВ діагностики

З аналізу відомих вітчизняних та зарубіжних публікацій щодо будови та застосування засобів діагностики на основі методу газорозрядної візуалізації можна визначити перспективи розвитку цього наукового напрямку [4].

Розглянемо пріоритетні шляхи модернізації основних компонентів, вузлів та елементів ланцюга газорозрядного процесу, а також етапи подальшої обробки візуальних зображень.

1. Побудова генераторів високої напруги – з використанням L- та /або С-накопичувачів енергії, п'єзоелектричних високовольтних генераторів, трибоелектричних генераторів, електретних генераторів, з перемикачами струму механічного, електричного чи іншого типу.

1.1. Одноімпульсний режим збудження газового розряду.

Використання джерела постійної напруги. Робота на перехідних процесах у момент увімкнення/вимкнення напруги, характеристики визначаються швидкістю перехідних процесів (похідна dU/dt). Параметри, що варіюються: амплітуда піку, величина градієнта наростання/спаду імпульсу, інтегральна потужність імпульсу.

1.2. Режим багатоімпульсного збудження з регульованим числом імпульсів в серії.

Варіюються параметри: амплітуда, шпаруватість імпульсів, їх тривалість, кількість і форма імпульсів.

1.3. Стимуляція розряду періодичним сигналом синусоїдальної чи іншої періодичної форми імпульсу (крім прямокутної) з постійною або змінною в часі амплітудою. Параметри регулювання: амплітуда, частота і форма імпульсів.

1.4. Наявність модуляції, її тип – амплітудна, частотна, амплітудно-імпульсна, частотно-імпульсна, широтно-імпульсна, змішані форми модуляції.

1.5. Режим збудження газового розряду з програмним цифровим формуванням високовольтної напруги, при синхронізації сигналами біологічного зворотного зв'язку.

2. Вимірювальні сенсори.

Прозора для спектру випромінювання газового розряду діелектрична основа сенсору, з товщиною та площею оптимальними для забезпечення необхідної напруженості електричного поля та незначних механічних деформацій при розміщенні об'єкта дослідження. Наявність прозорого провідникового електрода (напилення на діелектричну основу). Двоелектродне або псевдоодноелектродне підключення до джерела високовольтної напруги.

3. Відеоперетворювачі та способи знімання інформації.

Твердотільні фотоприймачі та перетворювачі випромінювань: електронно-оптичні та інші перетворювачі, твердотільні детектори, фотоелектронні помножувачі, помножувачі вторинної електронної емісії, ПЗЗ-матриці, світловоди, світлофільтри, дифракційні ґрати, аналізатори спектрального складу випромінювання.

Формування плоских або просторових зображень світіння розряду, контактна або дистанційна зйомка.

4. Способи обробки та інтерпретації експериментального матеріалу. Поєднання з іншими методами діагностики, калібрування, атестація методу та засобів ГРВ. Приведення у відповідність показників отриманого зображення до характеристик об'єкта, що діагностується. Використання методів математичної статистики, оцінювання достовірності, відтворюваності результатів. Встановлення кореляції відгуку з фактором впливу.

5. Комплексування з іншими методами інструментального дослідження. Врахування впливу на процеси ГРВ супутніх фізичних процесів: електромагнітних випромінювань, їх амплітудно-частотних показників; геомагнітних факторів, фонового рівня іонізуючих випромінювань, динаміки змін атмосферного тиску та газових складових повітря.

6. Поєднання з методами та приладами корекції функціонального та фізіологічного стану людини для створення програмно-апаратних комплексів для професійного та домашнього застосування.

7. Створення програмних додатків для цільової ГРВ-діагностики адаптованих для поширених програмних середовищ персональних комп'ютерів, планшетів, мобільних телефонів.

Наведений перелік напрямів є перспективною базою розвитку методів газорозрядної візуалізації. Основним є широкий спектр дослідницьких і практичних задач, які можна вирішувати з використанням ГРВ-засобів.

Висновки

1. Аналіз фізичних та технічних положень газорозрядної візуалізації показав, що при відносній сталості фізичних закономірностей виникнення розряду режими вимірювання інформативних показників зображень в ГРВ-засобах суттєво відрізняються (амплітуда, частота, тривалість, форма змінної напруги).

2. Умови виникнення розряду є чутливими до електрофізичних та емісійних властивостей об'єкту дослідження, але одночасно і до змін фізико-хімічних показників атмосферного повітря.

3. Практично кожна конструкція відрізняється видом сенсору, способом та пристроєм реєстрації первинного випромінювання, алгоритмами оброблення та відтворення діагностичного зображення.

4. В медико-біологічній галузі є найбільша кількість практичних застосувань ГРВ-засобів різних конструкцій. Для коректного порівняння результатів діагностики, отриманих різними дослідниками, потрібна стандартизація технічних характеристик ГРВ-засобів та алгоритмів отримання інформативних показників.

5. В технічній діагностиці методи та засоби ГРВ не набули поширення. На базі відпрацьованих рішень для біологічних об'єктів є перспективним використання ГРВ-засобів для контролю складу технічних рідин, неруйнівної дефектоскопії матеріалів і конструкцій.

6. Для використання сучасних інформаційних технологій перевага повинна надаватись побудові апаратно-програмних комплексів ГРВ-діагностики на основі якісних зразків цифрових відеокамер.

7. При проведенні ГРВ-діагностики рекомендується додавати інформацію про характеристики оточуючого атмосферного повітря (температура, вологість, тиск).

Запропоновані технічні рішення потребують експериментальної перевірки. Необхідні порівняльні дослідження діагностичних висновків, отриманих на основі ГРВ-засобів з сертифікованими діагностичними засобами.

Список літератури:

1. Медична діагностика. Технічна діагностика. <https://uk.wikipedia.org/wiki>
2. Потяженко М. М. Інноваційні методики об'єктивного обстеження з комп'ютерним тестуванням в еволюції реєстрації фізичних феноменів лікарем терапевтичного профілю: історія, реальність, перспективи / М. М. Потяженко, Г. В. Невоїт // Медична інформатика та інженерія. 2018. № 4. С. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2018.4.9894>
3. Oliinyk V., Babakov M., Lomonosov Y., Oliinyk V., Zinchenko O. Modernization of gas discharge visualization for application in medical diagnostics // *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. 4 (1 (66)). P. 21–29. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.263397>
4. Korotkov K.G. Advances in Diagnosis and Monitoring of the human quantum informational field with GDV technique // *ParaDigm 2001: Consciousness and Paranormal Phenomena*, 2008. https://www.researchgate.net/publication/228831552_Advances_in_Diagnosis_and_Monitoring_of_the_human_quantum_informational_field_with_GDV_technique
5. Method for Determining the Condition of a Biological Object and Device for Making Same / United States Patent (10) Patent No.: US 8,321,010 B2 // Korotkov et al. Date of Patent: Nov. 27, 2012
6. Білінський Й. Й. Методи і засоби газорозрядної візуалізації для аналізу рідиннофазних біооб'єктів : монографія / Й. Й. Білінський, О. А. Павлюк. Вінниця : ВНТУ, 2016. 120 с.
7. Application of Electrophoton Capture (EPC) Analysis Based on Gas Discharge Visualization (GDV) Technique in Medicine: A Systematic Review / K.G. Korotkov, P. Matravers, D.V. Orlov [et al.] // *J of Alternative and Complementary Medicine*. 2010. Vol. 16. № 1. P. 13–25.
8. Кухтин В. В. Апаратна реалізація і діагностичні можливості методу газорозрядної візуалізації / В. В. Кухтин, П. В. Петельський, Ю. В. Чепурний // *Вісник Нац. техн. ун-ту "КПІ". Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2010. № 42. С. 139–144.
9. Білінський Й. Й. Дослідження спектрів випромінювання рідиннофазних об'єктів при газорозрядній візуалізації / Й. Й. Білінський, О. А. Павлюк, С. В. Юкиш // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2014. № 3. С. 58–61.
10. Глухова Н. В. Інформаційна технологія для аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання / Н. В. Глухова, Л. А. Пісоцька // *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2018. Вип. №12. С. 48–52.
11. Reizer Ju.P. *Gas Discharge Physics*. Springer, 2001. 449 p.
12. Glukhova N.V. Application of wavelets transform for analysis of images of gas-discharge radiation of water N.V. Glukhova, L.A. Pesotskaya, N.G. Kuchuk, J.N. Kharlamova // *Системи обробки інформації*. 2016. № 2(139). С. 179-185.
13. Xanadu C. Analysis of kirlian images: feature extraction and segmentation / Xanadu C. Halkias, Petros Maragos // *IEEE (School of Electrical & Computing Engineering, National Technical University of Athens, Zografou 15773 Athens, Greece)*. 2004. P. 4.
14. Retrieved from: http://xn--annciowww-68a.bio-well.com/assets/files/kirlian_devices.pdf
15. DEVICE FOR DETERMINING THE STATE OF A BIOLOGICAL SUBJECT United States Patent Application Publication (10) Pub. No.: US 2010/0106424 A1 Korotkov et al.(43) Pub. Date: Apr. 29, 2010 Konstantin Georgievich Korotkov, Saint-Petersburg (RU); Svetlana Alexandrovna Korotkina, Saint Petersburg (RU); Ramiz Ragim-Ogly Jusubov, Saint Petersburg (RU).
16. Пат. 70099 Україна, МПК (2012.01) G03B 41/00, G03G 17/00. Пристрій для експрес-оцінки стану біологічного об'єкта / Семенець В. В., Подпружников П. М., Левенець О. С. № u 2011 13774; Заявл. 23.11.2011; Опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. 4 с.
17. Kulyk Y. A., Knysh V. P., Maslii R. V., Kvyetnyy R. N., Shcherba V. V., & Kulyk A. I. (2021). METHOD AND GAS DISCHARGE VISUALIZATION TOOL FOR ANALYZING LIQUID-PHASE BIOLOGICAL OBJECTS // *Informatyka, Automatyka, Pomiaru W Gospodarce I Ochronie Środowiska* 2021. №11(3). P. 22–29. <https://doi.org/10.35784/iapgos.2709>
18. Романий С. Ф. Неразрушающий контроль материалов по методу Кирлиана / С. Ф. Романий, Э. Д. Черный. Днепропетровск : Изд-во ДГУ, 1991. 144 с.

19. Швайко В. В. Лабораторний стенд для збудження і контролю дефектів в коронному розряді / В. В.Швайко В.В., К. М. Божко // 36. пр. 14-ї Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених у приладобудуванні. 4-5 грудня 2018 р., м. Київ. С. 210–213.

20. Babelyuk V. Y., Dobrovolskiy Y. G., Pidkamin L. I., Popovych I. L., Ushenko Yu. A. Usage of a gas-discharge visualization for an investigation of a human internal energy // Proc. SPIE 11369, Fourteenth International Conference on Correlation Optics, 1136929 (6 February 2020); doi10.1117/12.2553951

21. Babelyuk V., Tserkovniuk R., Babelyuk N., Zukow X., Ruzhylo S., Dubkova G., Korolyshyn T., Hubyts'kyi V., Kikhtan V., Gozhenko A., & Popovych I. The parameters of gas discharge visualization (biophotonics) correlated with parameters of acupuncture points, EEG, HRV and hormones // Journal of Education, Health and Sport. 2021. №11(12). P. 359–373. <https://apcz.umk.pl/JEHS/article/view/JEHS.2021.11.12.030>

22. Babelyuk V. Y., Popovych I. L., Gozhenko A. I., Dubkova G. I., Kozyavkina O. V., Korolyshyn T. A., Babelyuk N. V., Kovbanyuk M. M., Fihura O. A., Dobrovolskiy Y. G., Zukow W., & Yanchij R. I. (2023). Gas Discharge Vizualization (Electrophotonic Imaging, Kirlianography). Theoretical and Applied Aspects. Feniks. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7535880>

23. Bista S., Jasti N., Bhargav H., Sinha S., Gupta S., Ramarao P., Chaturvedi S., & Gangadhar B. (2022). Applications of Gas Discharge Visualization Imaging in Health and Disease: A Systematic Review. Alternative Therapies in Health and Medicine, AT6764. PMID: 35648690.

24. GOZHENKO Anatoliy, ZANTARAIA Toto and ZUKOW Walery. „Falling values”: artifacts or source of unique information? Drastically low electrical conductivity of acupuncture points is accompanied by significant deviations of EEG, HRV, immunity, metabolism and GDV parameters // Quality in Sport. 2024. №17. P.51006. eISSN 2450–3118. <https://dx.doi.org/10.12775/QS.2024.17.004> <https://apcz.umk.pl/QS/article/view/51006>

25. Nevoit G., Bumblyte I., Korpan A., Minser O., Potyazhenko M., Pliiev M., Vainoras A., & Ignatov I. The Biophoton Emission in Biotechnological and Chemical Research: from Meta-Epistemology and Meaning to Experiment. Part 1 // Ukrainian Journal of Physics, 2024. №69(3). P. 190. <https://doi.org/10.15407/ujpe69.3.190>

Надійшла до редколегії 14.09.2024

Відомості про авторів:

Зінченко Олександр Миколайович – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», аспірант, асистент кафедри радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій, Україна; e-mail: a.zinchenko@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5651-8931>

Олійник Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», професор кафедри радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій, Україна; e-mail: v.oliinyk@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7899-1591>

Подпружников Петро Михайлович – Харківський національний університет радіоелектроніки, провідний інженер служби доступності до можливостей навчання «ХНУРЕ без обмежень», Україна; e-mail: petro.podpruzhnykov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6714-81271>