

Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 006.91

Н.В. Глухова

ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ

РОЗРОБКА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ХАОТИЧНИХ СКЛАДОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Розглянуто існуючі проблеми, що виникають при розробці метрологічного забезпечення для аналізу сигналів від складних об'єктів та систем. Запропоновано доповнити існуючу модель сигналу вимірювальної інформації компонентою, що характеризує хаотичні вклади. Розроблений метод оцінки ступеня когерентності води, що ґрунтується на вилученні вимірювальної інформації з хаотичних складових формування зображення газорозрядного випромінювання. При розробці метрологічного забезпечення аналізу зображень запропоновано використання паспортного параметру «просторова частота».

Ключові слова: метрологічне забезпечення, газорозрядне випромінювання, фліккер-шумова спектроскопія.

Вступ

Відомо, що у галузі метрології об'єктом дослідження виступають різноманітні процеси, які протікають у фізико-хімічних, біологічних, електронних та інших системах, що за своєю природою виявляються коливальними або хвильовими. В останні роки класичні методи аналізу вимірювальної інформації, засновані на використанні опису гармонійних складових сигналів, втрачають актуальність, оскільки характеризуються суттєвою ідеалізацією реальних процесів, що призводить до неточностей у моделях.

Встановлено, що періодичні, а, особливо, гармонійні коливання, що породжуються природними або фізичними системами, є винятком. Як правило, реальні об'єкти характеризуються складною динамікою, обов'язковим компонентом якої виступають хаотичні явища [1]. Таким чином, формування нових підходів щодо аналізу вимірювальної інформації від складних реальних систем, яким притаманні хаотичні явища, виявляється актуальним науковим завданням.

Постановка проблеми та аналіз літератури. У роботі [2] підкреслюється, що найважливішою інформативною величиною сучасних засобів вимірювань та контролю є форма сигналу та його характеристики. У роботі розглядаються сигнали наступних класів: стаціонарні, нестаціонарні та періодичні. Для їх дослідження пропонується використання єдиної узагальненої фрактальної моделі. Розроблений підхід для встановлення меж існування ідентифікованих розподілів ймовірності у повному діапазоні, який розповсюджується від дискретного однозначного до дискретного двозначного з похибкою від 10 до 20% на рівні довірчої ймовірності 0,95.

Обмеженість стандартних метрологічних методів щодо вимірювання параметрів нелінійних динамічних систем продемонстровано у роботах [3 – 5].

У роботі [6] запропоновано модель вимірювання параметрів нелінійних динамічних систем, що ґрунтується на отриманні дискретного фазового портрету. При цьому з метою урахування невизначеності вимірювань отримані точкові оцінки відображення дискретного фазового портрету перетворюються в області, площі яких визначаються на базі розрахунку невизначеності результатів вимірювання. Однак, синтез моделі вимірювання нелінійної динамічної системи заснований на припущенні, що об'єкт вимірювань являє собою «чорну скриньку», тобто вважається закритою системою з невідомими параметрами та динамікою поведінки. Найбільш суттєвим обмеженням такого підходу в реальних умовах є відсутність урахування обміну речовиною з оточуючим середовищем.

Таким чином, на сьогоднішній день розробка метрологічного забезпечення дослідження складних динамічних нелінійних об'єктів знаходиться на початковій стадії розвитку. Запропоновані окремі методи та підходи щодо вирішення цієї задачі характеризуються низкою ідеалізацій та обмежень. Окрім того, їх дуже складно впроваджувати, оскільки це вимагає виконання на практиці динамічних вимірювань. Сучасні проблеми метрології динамічних вимірювань розглядалися на відповідному міжнародному семінарі в 2012 році у Франції [7]. Дослідження метрологічних характеристик у калібрувальних лабораторіях, як правило, реалізується у статичних режимах. Встановлення динамічних характеристик засобів вимірювань обмежується відсутністю стандартизації методів та прийнятих процедур.

Постановка завдання. На практиці часто дослідження властивостей складних нелінійних об'єктів ґрунтується на реєстрації сигналів або зображень, які ними генеруються. Вимірювальна інформація того роду формується на базі еволюційної

динаміки нелінійних систем з детермінованим хаосом. Синтез метрологічного забезпечення аналізу сигналів, що містять хаотичні вклади, передбачає розробку методів параметризації хаотичних сигналів, у загальному випадку представлених у вигляді часових або просторово розподілених рядів.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом досліджень у даній роботі обрані зразки рідиннофазної речовини, зокрема води та водних розчинів. На прикладі води можна наявно продемонструвати існуючі проблеми дослідження складних об'єктів. Незважаючи на те, що вода є однією з найбільш розповсюджених речовин на планеті, багато її властивостей трактується як «аномальні» завдяки тому, що спроби їх аналітичного опису заводять вже не одно покоління вчених у глухий кут.

Такий стан пояснюється насамперед тим, що вода виявляється складним динамічним об'єктом. Тому, якщо відслідкувати історичні кроки розвитку представлень про її структуру та відповідні розроблені моделі, то можна виділити два принципово різних підходи [8]. У рамках першого вважається, що модель структури рідини можна звести до набору кореляційних функцій. Вони описують розподіл відстаней між атомами, тому визначати їх конкретне розташування немає сенсу.

Прихильники другого підходу наполягають на використанні моделей, що передбачають конкретне розташування атомів. У рамках даного напрямку досліджень запропоновано багато варіантів сітки водневих зв'язків у клатратних гідратах. Такого роду моделі отримали поширення завдяки властивостям комп'ютерного моделювання, що забезпечило можливість на основі числових експериментів розрахувати конкретні матриці координат некристалічних речовин. Координати, які були отримані на базі комп'ютерного моделювання, відносяться до так званих миттєвих структур. Життя молекули у «статичному» режимі завдяки наявності теплових флуктуацій складає величину приблизно 10^{-11} с, а далі молекула займає інше місце у просторі.

Таким чином, відстежити конкретні координати експериментальним шляхом не виявляється можливим. Координати, які отримують на базі застосування сучасних методів дифракції рентгенівських променів або нейтронів, можна віднести тільки до усередненої за часом та за простором ідеалізованої структури. Миттєві структури моделі води отримали назву I-структур. V-структурами було названо ідеалізовані усереднені за коливаннями структури.

Зрозуміло, що для такого динамічного об'єкту як вода, виявляється неможливим застосування на практиці підходів щодо метрологічного забезпечення та, зокрема, моделей вимірювання параметрів нелінійних динамічних систем, розглянутих у розді-

лі «аналіз літератури». На практиці з метою аналізу систем, які характеризуються хаотичною динамікою, використовуються підходи, що базуються на експериментальному отриманні та аналізі часових та просторових сигналів та зображень.

У такому контексті необхідне використання відповідно скорегованої класифікації сигналів та процесів з урахуванням можливого існування хаотичних їх компонент.

Традиційно в метрологічній практиці розглядається два види складових сигналів: детерміновані та випадкові. Наявним прикладом такого підходу є аналіз стохастичних систем на основі дискретних моделей, вихідними даними яких слугують часові реалізації випадкових процесів, які генеруються такими системами. У такому випадку часовий ряд, отриманий експериментальним шляхом, повинен містити ординати реалізації випадкового процесу, зафіксовані у дискретні моменти часу (з постійним інтервалом дискретизації). У такому разі вони можуть бути описані на базі цифрових параметричних стохастичних моделей авторегресії та ковзного середнього (АРКС). Наприклад, для АРКС процесу порядку (m, n) можна записати:

$$x(k) = \sum_{i=1}^m c_i x(k-i) + \sum_{j=1}^n d_j e(k-j) + e(k), \quad (1)$$

де $x(k)$ – значення дискретного часового ряду у k -й момент часу; $e(k)$ – послідовність незалежних, однаково розподілених випадкових величин з нульовим математичним очікуванням та одиничною дисперсією; c_i – параметри авторегресії; d_j – параметри ковзного середнього.

Однак на основі використання рівняння (1) не можуть бути відокремлені регулярні детерміновані, випадкові та хаотичні компоненти сигналу виміральної інформації.

Розглянемо, наприклад, результати використання методу газорозрядного випромінювання, який застосовується при дослідженні стану рідиннофазних об'єктів [9]. При впливі на досліджуваний зразок рідини зовнішнього електромагнітного поля на фотоматеріалі фіксується картина розподілу газового розряду. Результатом вимірювань є зображення, яке складається з двовимірного простору розподілу яскравостей як функції просторової координати.

Грунтуючись на фізичних основах методу, можна стверджувати, що сигнали виміральної інформації містять у своєму складі три компоненти: регулярну детерміновану, випадкову та хаотичну.

Регулярна складова визначається формою, геометричними характеристиками та фізико-хімічними параметрами досліджуваного зразка. Кореляційний зв'язок між фізико-хімічними властивостями та геометричними ознаками зображення при використанні ме-

тоту газорозрядної візуалізації встановлений у роботі [10]. Додатково на результати експерименту впливає низка неінформативних параметрів стохастичної природи, що, безумовно, викликає, наявність у зареєстрованому зображенні випадкових викидів. Фактори, що є джерелом випадкових явищ на картинах світіння зразка рідини проаналізовані у роботі [11].

Слід зазначити, що хаотичні компоненти зареєстрованих зображень газорозрядного випромінювання не досліджувались та не виявлялись. Одним з пріоритетних аналітичних підходів вилучення вимірювальної інформації з хаотичних сигналів, який отримав в останні роки широке розповсюдження, є фліккершумова спектроскопія (ФШС). Використання ФШС дозволило створити наукові основи нового перспективного напрямку – флуктуаційної метрології [12].

Таким чином, аналізуючи з метрологічної точки зору експериментальні дані, зареєстровані як сигнали вимірювальної інформації від складних об'єктів, можна прийти до висновку щодо необхідності принципового розширення термінів та моделей вимірювань, які застосовуються при розробці наукових засад метрологічного забезпечення дослідження характеристик складних об'єктів. Стандартні метрологічні підходи щодо опису конкретних проявів динаміки складних об'єктів, які утворюються за умови зовнішніх впливів (зокрема при активному вимірювальному експерименті) характеризуються низкою обмежень.

Основним завданням є обґрунтована параметризація зареєстрованих під час вимірювального експерименту сигналів або зображень, яка забезпечить виділення саме тих інформаційних параметрів, які можуть бути використані у якості метрологічних характеристик стану досліджуваного об'єкта або системи.

Таким чином, стандартну модель сигналу вимірювальної інформації необхідно доповнити компонентою, що відповідає хаотичним складовим:

$$y(t) = C[v(t)]x(t) + e(t) + h(t), \quad (2)$$

де $x(t)$ – детермінована складова неспотвореного сигналу від досліджуваного об'єкта; C – масштабний множник; $v(t)$ – мультиплікативна складова невизначеності; $e(t)$ – адитивна складова невизначеності; $h(t)$ – хаотичні вклади.

Одним з фундаментальних завдань флуктуаційної метрології, як зазначають автори роботи [12], виступає розробка метрологічної нормативно-технічної бази та підходів щодо стандартизації параметрів складних об'єктів на основі «діагностики шуму». Підхід, заснований на дослідженні шуму та, зокрема, хаотичних компонент сигналів, що реєструються під час активних вимірювальних експериментів зі складними об'єктами, вже продемонстрували свою ефективність та унікальність при розв'язанні різноманітних практичних завдань в

галузях пошуку дефектів електронних та електричних схем, наноелектроніки, хімічній промисловості. Стандартизація вимірювань хаотичних сигналів виявляється найбільш актуальною при дослідженні природних об'єктів та систем.

Метрологічне забезпечення дослідження хаотичних складових, безумовно, знаходиться на початковій стадії розвитку. Звернемося до прикладу застосування методології ФШС з метою виділення паспортних параметрів хаотичних поверхневих структур шляхом атомно-силової мікроскопії (АСМ), при параметризації дендритних структур [12]. При розв'язанні поставлених задач у якості вхідної вимірювальної інформації було використано оцифровані зображення профілів шорсткості монокристалів та АСМ-зображення плуроніку. З метою виділення паспортних параметрів структур були отримані графіки спектрів потужності та різницевої моментів для проєкцій зображення. При цьому одиниці вимірювання за віссю абсцис автор залишив ніяк не позначеними.

З метрологічної точки зору ФШС може бути застосована як до сигналів, що змінюються у часі, так і до функцій просторових параметрів. У тому випадку, коли ми маємо справу з необхідністю розробки метрологічного забезпечення при аналізі вимірювальної інформації у вигляді зображень виявляються додаткові проблеми з відсутністю стандартизованих методик вирішення такого класу задач.

Зокрема, фактично усі параметри зображення необхідно розглядати як функції такого параметру як координата. Спроба використання підходів частотного аналізу призводить до необхідності введення у цілому незвичного для багатьох параметру – просторова частота. Зокрема, при вилученні вимірювальної інформації з хаотичних сигналів у випадку представлення результатів вимірювань у вигляді зображень, використання такого параметру як просторова частота виявляється ключовим ланцюгом при розв'язанні завдання.

Переходячи до розгляду завдання розробки метрологічного забезпечення методу вимірювань, заснованому на реєстрації та аналізі зображень газорозрядного випромінювання рідиннофазних об'єктів, стимульованих впливом зовнішнього електромагнітного поля, корисний сигнал вимірювальної інформації можна представити у наступному загальному вигляді:

$$b_z = b_{det} + b_s^{\circ} + b_h, \quad (3)$$

де b_{det} – детермінована компонента зареєстрованого сигналу, що обумовлена корисними властивостями досліджуваного рідиннофазного об'єкта; b_s° – випадкова неінформативна компонента, що виникла під впливом зовнішніх факторів; b_h – хаотичні вклади у результуючий сигнал, викликані складною динамікою процесів, які проявилися в результаті актив-

ного вимірювального експерименту від складного об'єкту досліджень.

Деталізація компонентів візуальних сигналів вимірювальної інформації для випадку зображень газорозрядного випромінювання обумовлена фізичною сутністю процесів під час вимірювань. Детерміновану компоненту обумовлюють, насамперед, геометричні параметри досліджуваного рідиннофазного об'єкту у вигляді краплі рідини (рис. 1).

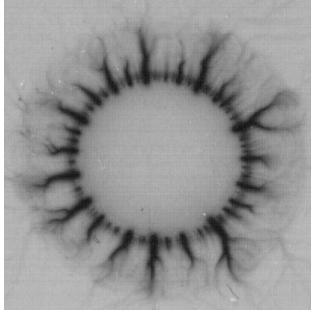


Рис. 1. Зображення газорозрядного випромінювання води з природного джерела

Також на геометричні ознаки зображення випромінювання безпосередньо впливають фізико-хімічні властивості води. Наприклад, забруднення її різноманітними домішками змінює розподіл яскравості внутрішнього кола світіння та окремих розрядних треків (стрімерів) у зовнішній короні світіння навколо краплі (рис. 2).

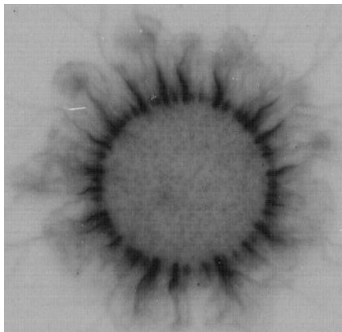


Рис. 2. Зображення газорозрядного випромінювання водопровідної води, що не задовольняє вимогам якості очищення

Випадкова компонента у виразі (3) виникає унаслідок впливу зовнішніх факторів, наприклад, таких як температура, вологість та склад повітря при реєстрації газорозрядного випромінювання.

Значний науковий інтерес викликає детальний аналіз хаотичних вкладів. Було висунуто припущення, що параметризація хаотичних вкладів дозволить визначити біологічні властивості води, зокрема ступінь когерентності. Важливість оцінки когерентного стану води розглянуто у працях [13 – 16].

На основі застосування методології ФШС щодо обробки зображень газорозрядного випромінювання зразків води дозволило встановити ступінь її когерентності (табл. 1).

Таблиця 1
Кількісні оцінки параметрів газорозрядного світіння зразків води

| Параметри фліккер-шумів газорозрядного світіння зразків води | Рівень ступеня когерентності води | | |
|--|-----------------------------------|-------------|-------------|
| | Низький | Середній | Високий |
| Максимальне значення просторової частоти спектра потужності | 150±5 | 160±5 | 210±±20 |
| Середнє значення амплітуди потужності | 0,05±±0,01 | 0,14±±0,028 | 0,32±±0,064 |

Як видно з табл. 1, у запропонованому методи визначення ступня когерентності води в якості одного з паспортних параметрів використовується максимальне значення просторової частоти спектра потужності. Функціональна залежність рівня яскравості пікселів від координати $b(x)$ аналізується на базі обчислення кореляційного зв'язку поточного значення $b(x)$ з наступними при зростанні просторової координати зображення $b(x+\Delta)$, $\Delta > 0$:

$$\psi(\Delta) = \langle b(x)b(x+\Delta) \rangle_{L-\Delta},$$

де Δ – параметр просторового здвигу; кутові дужки позначають усереднення за інтервалом $(L-\Delta)$.

Далі здійснюється перетворення цієї функції у вигляді неповного косинус-перетворення автокорелятору – спектру потужності. Останнє перетворення необхідно для переходу від функції яскравості за аргументом «просторова координата» до спектру потужності за аргументом f_x – «просторова частота», тобто:

$$S(f_x) = \int_0^L \langle b(x)b(x+x_1) \rangle_{L-x_1} \cos(2\pi f_x x_1) dx_1.$$

Локальні значення яскравості пікселів $b(x)$ мають сенс динаміки зміни яскравості уздовж обраного напрямку профілю з залученням кількісної оцінки автокореляційної функції. Це дозволяє визначити у якості параметрів максимальне значення просторової частоти f_x та середнє значення амплітуди потужності шумів для середнього діапазону частот.

Висновки

У роботі розглянуто існуючі проблеми розробки метрологічного забезпечення при дослідженні хаотичних вкладів, що містяться у сигналах від складних природних об'єктів. Оскільки сучасний етап розвитку метрології передбачає активний розвиток візуалізації при дослідженні об'єктів, то проблема синтезу метрологічного забезпечення обробки сигналів та зображень від досліджуваних об'єктів виходить на перший план.

Застосування активного виду вимірювального експерименту, який дозволяє реєструвати візуальну картину реакції досліджуваного об'єкту на зовнішній вплив, виявляється перспективним напрямком аналізу природних об'єктів. Візуалізація результатів активного

експерименту у вигляді зображень має певні переваги над звичайною реєстрацією окремих параметрів об'єкту вимірювань у вигляді одновимірних векторів даних як функцій часу. Зображення, що представляється у цифровій формі у вигляді матриці, потенційно містить значно більші об'єми вимірювальної інформації. Однак використання зображень у якості вимірювальної інформації висуває додаткові вимоги щодо метрологічного забезпечення, зокрема до розробки методів аналізу візуальної інформації.

У якості методології аналізу зображень газорозрядного випромінювання води використовується методологія ФШС. На основі обробки експериментальних даних, отриманих в результаті активного вимірювального експерименту при впливі на зразок води зовнішнім електромагнітним полем, встановлено, що ступінь когерентності води може бути визначена на базі застосування паспортного параметру «просторова частота».

Розроблений метод дослідження рідиннофазних об'єктів пропонується використовувати у якості експрес-методу оцінки біологічної активності води, що є дуже актуальним у сучасних екологічних умовах.

Список літератури

1. Кипчанов А.А. Количественная оценка сложности колебаний и формирование тестовых хаотических сигналов. / А.А. Кипчанов. – Автореф. к.ф.-м.н. – Саратов. – 1996. – 22 с.
2. Кликушин Ю.Н. Идентификационные шкалы: теория, технологии, системы / Ю.Н. Кликушин. – Дисс. ... на соискание уч. степени д.т.н. – Омск. – 2000. – 340 с.
3. Machehkhin Yu. Physical models for analysis of measurement results / Yu. Machehkhin // *Measurement Techniques*, Springer New York. – 2005. – Vol. 48. – № 6. – Pp. 555-561.
4. РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». Дата введения 2003-07-01.

5. Мачехин Ю.П. Энтропийный анализ динамических переменных / Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской // *Системы обработки информации*. – 2013. – № 1 (108). – С. 100-104.

6. Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем / Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской // *Системы обработки информации*. – 2012. – № 1 (99). – С. 169-175.

7. Report of Workshop on Metrology for Dynamic Measurement, 15-16 November 2012. – Venue: BIPM, Sèvres France. [Електрон. ресурс]. Режим доступу: http://www.bipm.org/en/conference-centre/bipm-workshops/dynamic_measurement.

8. Маленков Г.Г. Структура и динамика жидкой воды / Г.Г. Маленков // *Журнал структурной химии. Приложение*. – 2006. – Том 47. – С. 5-35.

9. Глухова Н.В. Оцінка невизначеності ентропії зображень випромінювання води / Н.В. Глухова // *Системы обработки информации*. – № 6 (131). – 2015. – С. 36-38.

10. Короткин А.И. Связь параметров ГРВ-Грамм с вязкостью и поверхностным натяжением жидкости / А.И. Короткин, Э.В. Крыжановский // *Сознание и физическая реальность*. – 01/2006. – Том 11. – № 1. – С. 49-51.

11. Анализ систематических погрешностей и воспроизводимости данных в методе ГРВ / Р.А. Александрова, Г.Б. Федосеев, К.Г. Коротков, Н.А. Филиппова и др. // *Мат-лы 4-ого междунар. Конгресса «Наука, Информатика, Сознание»*. – СПб., 2000. – С. 1-4.

12. Fundamentals of fluctuation Metrology / S.F. Timashev, Yu.S. Polyakov, S.G. Lakeev, P.I. Misurkin and others // *Russian Journal of physical chemistry*. – 2010. – №10. – Pp. 1807-1825.

13. Ho M.W. Cooperative and coherent water / M.W. Ho // *Science in Society*. – 2010. – № 48. – Pp. 6-9.

14. Quantum Coherent Water and Life // Available at: http://www.i-sis.org.uk/Quantum_Coherent_Water_Life.php.

15. Del Giudice E. Old and new views on the structure of matter and the special case of living matter / E. Del Giudice // *Journal of Physics: conference Series*. – 2007, 67.

16. Del Giudice E. Water dynamics at the root of metamorphosis in living organisms / E. Del Giudice, P. Spinetti, A. Tedeschi // *Water*. – 2010. – № 2. – Pp. 566-586.

Надійшла до редколегії 15.07.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.І. Корсун, Національний гірничий університет, Дніпропетровськ.

РАЗРАБОТКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ХАОТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Н.В. Глухова

Рассмотрены существующие проблемы, которые возникают при разработке метрологического обеспечения для анализа сигналов от сложных объектов и систем. Предложено дополнить существующую модель сигнала измерительной информации компонентой, которая характеризует хаотические вклады. Разработан метод оценки степени когерентности воды, который основан на извлечении измерительной информации из хаотических составляющих формирования изображения газоразрядного излучения. При разработке метрологического обеспечения обработки изображений предложено использование параметра «пространственная частота».

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, газоразрядное излучение, фликкер-шумовая спектроскопия.

THE DEVELOPMENT OF METROLOGICAL SUPPORT IN THE INVESTIGATION OF CHAOTIC COMPONENTS OF MEASURING INFORMATION

N.V. Glukhova

The existing problems that arise in the development of metrology support for signal analysis from complex objects and systems were considered. The existing model of signal measurement information that component characterizes the chaotic contributions was improved. The method for evaluating the degree of water coherence, that based on the measurement information extraction from chaotic components of gas-discharge emission image forming was developed. Using the parameter "spatial frequency" was suggested in the development of metrological support of image processing.

Keywords: metrological support, gas-discharge emission, flicker-noise spectroscopy.