

Mathematical processing of results of experimental studies was carried out by regression analysis. Regression equation that relates the magnitude of the electromotive force in a coil and a magnetic separator performance by magnetic product is given. Conclusion is drawn that estimation of magnetic separator efficiency by magnetic product is adequately accurate. Obtained results allow

developing a system of automatic control of magnetic separators efficiency.

Keywords: *automatic control, magnetic separator, magnetic product, performance, electromotive force.*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Ткачовим. Дата надходження рукопису 14.06.11

УДК 621.391.26(075)

**Н.В. Глухова, канд. техн. наук, доц.,
І.В. Коваленко**

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,
e-mail: kovalenko78@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОСИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ M-DAQ/OEM

**N.V. Glukhova, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
I.V. Kovalenko**

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: kovalenko78@ukr.net

MEASURING TRANSFORMERS DYNAMIC PROPERTIES STUDY BY MEANS OF DATA COLLECTION MICROSYSTEM M-DAQ/OEM

Мета роботи. Найбільш розповсюдженою схемою досліджень властивостей окремих вимірювальних перетворювачів або вимірювальних каналів у цілому є застосування спектрального аналізу на основі перетворення Фур'є. Цей математичний апарат має певні обмеження при дослідженні нестационарних та імпульсних сигналів. При дослідженні динамічних властивостей вимірювальних перетворювачів виявляється актуальним застосування поряд з класичними, широко розповсюдженими методиками, й інших математичних апаратів, наприклад вейвлет-аналізу та віконного перетворення Фур'є.

Методика досліджень. Для дослідження інформаційно-вимірювальних сигналів необхідно завести їх у комп'ютер. Із цією метою використано мікросистему збору даних m-DAQ з інтерфейсом USB. Проаналізовано різні частотно-модульовані сигнали в каналі збору даних та їх спектри потужності, а також частотно-модульований сигнал, який містить викиди, і його спектр потужності. Наведено спектрограми віконного перетворення Фур'є для кожного сигналу. За допомогою вейвлет-перетворення проаналізовано періодичний сигнал, неперіодичний нестационарний сигнал, сигнал з розривом.

Результат. Зроблено висновок, що зміна послідовності частот сигналу та наявність різких імпульсних викидів не призводить до змін у спектрі потужності для швидкого перетворення Фур'є. Для неперіодичного нестационарного сигналу можна побудувати вейвлет-спектр як тільки для малих значень часового масштабу, так і для височастотних складових шуму при іншому часовому масштабі. Для сигналу з розривом за допомогою вейвлет-спектру чітко спостерігаються локальні особливості сигналу.

Оцінка результатів. Виконані дослідження приводять до висновку, що немає єдиного універсального, найкращого для будь-якого випадку, підходу. Навіть такий новий та потужний інструмент як вейвлет-аналіз не здатний розрізняти ефекти амплітудної та частотної модуляції. Тому необхідно виконувати попередню обробку сигналу та встановлювати, до якого класу процесів його можна віднести.

Ключові слова: *вимірювальні перетворювачі, мікросистема збору даних, перетворення Фур'є, нестационарність, вейвлет-перетворення*

Актуальність теми. В останній час спостерігається тенденція широкого застосування комп'ютерної техніки при вирішенні задач розробки та експлуатації метрологічного забезпечення збору даних. При цьому вимірювальні перетворювачі поєднуються в канал збору даних, далі отримана вимірювальна інформація через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) потрапляє у комп'ютер, де відбувається її обробка, зберігання, представлення в зручній формі. Такі структури можуть забезпечувати достатньо високу швидкість та

виконувати обробку сигналів високої частоти. Тому оцінка метрологічних характеристик сучасних каналів збору даних вимірювань повинна передбачати визначення не тільки статичних, але і динамічних властивостей таких систем та окремих компонентів – вимірювальних перетворювачів.

Постановка завдання. Класичним підходом до аналізу динаміки вимірювальних перетворювачів є аналітичний опис у вигляді звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами та опис передавальними функціями. Але такий підхід може бути

застосований тільки для лінійних стаціонарних динамічних систем.

Окрім того, часто властивості окремих вимірювальних перетворювачів або вимірювальних каналів у цілому досліджуються за допомогою аналізу сигналів на їх входах та виходах. Найбільш розповсюдженою схемою таких досліджень є застосування спектрального аналізу на основі перетворення Фур'є. Останній математичний апарат також має певні обмеження при дослідженні нестационарних та імпульсних сигналів.

Таким чином виявляється, що класичні підходи дослідження об'єктів та процесів обмежуються стаціонарними системами. Але практично всі реальні динамічні системи є, у певній мірі, нелінійними і нестационарними як і сигнали, які вони генерують або перетворюють. Тому, при дослідженні динамічних властивостей вимірювальних перетворювачів, виявляється актуальним застосування поряд із класичними, широко розповсюдженими методиками, й інших математичних апаратів, наприклад вейвлет-аналізу та віконного перетворення Фур'є.

Основна частина. Для дослідження інформаційно-вимірювальних сигналів необхідно, перш за все, завести їх у комп'ютер. Із цією метою використовуємо мікросистему збору даних m-DAQ з інтерфейсом USB [1]. Мікросистема збору даних (рис. 1) містить 8-канальний АЦП, 10 біт, 100 кГц; 2 канали цифроаналогового перетворювача (ЦАП) (ШІМ); універсальні канали дискретного вводу-виводу транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ) з індивідуальною конфігурацією на ввід або вивід.



Рис. 1. Мікросистема збору даних m-DAQ/OEM

Один із каналів дискретного вводу-виводу може використовуватися як вхід лічильника, інший як вхід зовнішнього запуску АЦП або синхронізації. Програмне забезпечення до мікросистеми містить драйвер, DLL-бібліотеку, Іb-бібліотеку для середовища графічного програмування LabView.

Нагадаємо, що під динамічними властивостями розуміють такі властивості засобів вимірювань, які виявляють свій вплив тільки при зміні вимірюваної величини у часі. Динаміку лінійного стаціонарного вимірювального перетворювача із зосередженими параметрами можна коректно описати звичайними диференціальними рівняннями зі сталими коефіцієнтами

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) =$$

$$= b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t),$$

де $x(t)$ – вхідний сигнал вимірювального перетворювача; $y(t)$ – його вихідний сигнал.

При переході до передавальної функції (при нульових початкових умовах) отримуємо рівняння

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}.$$

Якщо позначити поліном чисельника через $B_m(p)$, а поліном знаменника через $A_n(p)$, то їх відношення складає оператор лінійної стаціонарної системи L , який описує зміни сигналу у вимірювальному перетворювачі

$$y(t) = \frac{B_m(p)}{A_n(p)} x(t) = Lx(t).$$

Якщо параметри перетворювача змінюються у часі, то коефіцієнти багаточленів $A_n(p)$ та $B_m(p)$ виявляються змінними, оператор L залежить від моменту часу, а сам вимірювальний перетворювач класифікується як нестационарний. Тоді всі сигнали на його виході, у загальному випадку, теж необхідно вважати нестационарними.

Розглянемо декілька характерних прикладів спектрального аналізу інформаційно-вимірювальних сигналів. Відомо, що одним із найбільш розповсюджених методів передачі вимірювальної інформації є частотна модуляція [2]. Тоді сигнал у каналі збору даних може виглядати так, як показано на рис. 2.

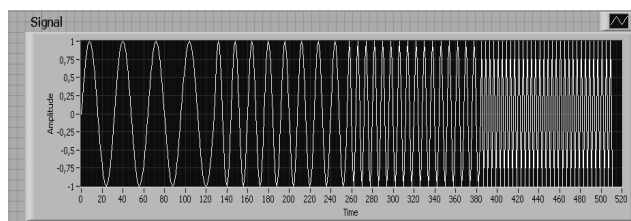


Рис. 2. Лінійно-частотно-модульований сигнал 1 у каналі збору даних

На рис. 2 показаний періодичний синусоїдний сигнал, частота якого стрибками змінюється. На рис. 3 відображується спектр потужності даного сигналу, на якому видно існування чотирьох гармонік з різною частотою.

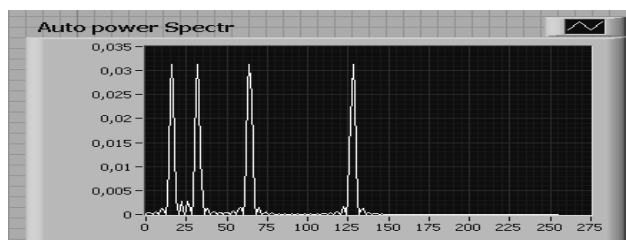


Рис. 3. Спектр потужності сигналу 1 для швидкого перетворення Фур'є

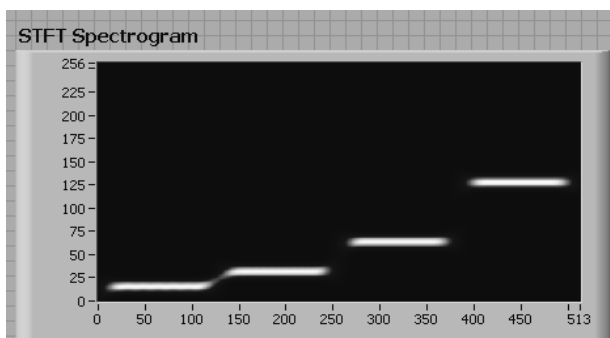


Рис. 4. Спектрограма для віконного перетворення Фур'є сигналу 1

Графік рис. 4 буде проаналізовано пізніше. При іншому порядку зміни частот спостерігаємо графік, показаний на рис. 5.

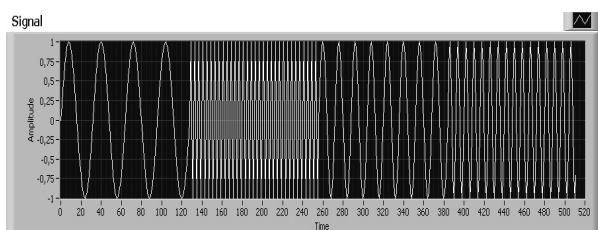


Рис. 5. Частотно-модульований сигнал 2 при зміні частоти стрибками в каналі збору даних

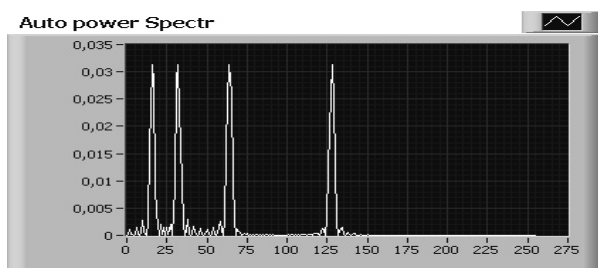


Рис. 6. Спектр потужності сигналу 2 для швидкого перетворення Фур'є

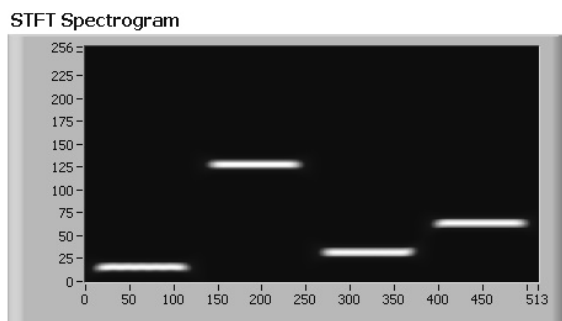


Рис. 7. Спектрограма для віконного перетворення Фур'є сигналу 2

Порівняння зображень з рис. 3 та рис. 6 наглядно показує, що суттєві зміни частотно-модульованого сигналу в часовій області не викликають ніяких змін у спектрі потужності. Це дозволяє зробити висновок:

застосування швидкого перетворення Фур'є не здатне відобразити часові зміни сигналу в частотній області. На відповідних графіках, рис. 4 та рис. 7, показані спектрограми для віконного перетворення Фур'є.

Віконне перетворення Фур'є [2] – модифікація перетворення Фур'є для віконного сигналу, тобто перетворення, яке надає інформацію щодо частоти сигналу в обмеженому часовому інтервалі. Для порівняння вказаних видів перетворень розглянемо їх аналітичний опис. Для довільної залежності $y(t)$ пряме перетворення Фур'є забезпечує перехід від часового представлення сигналу до його частотного відображення

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Віконне (короткочасне) перетворення Фур'є аналітично описується виразом [3]

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)w(t-b)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

де функція $y(t)$ додатково помножується на віконну вагову функцію $w(t-b)$. Параметр b визначає здвиг вікна за часовою віссю.

Застосування перетворення Фур'є надає можливість побудови графіка в координатах частота-амплітуда, тобто отримання амплітудно-частотної характеристики. Віконне перетворення Фур'є дозволяє побудувати спектрограму, яка представляє собою частотно-часовий опис сигналу, тобто можна бачити як змінюється частота сигналів у часі (рис. 4, 7). Однак, у деяких випадках нестационарних сигналів, віконне перетворення Фур'є виявляється таким же недієздатним як і звичайне [3].

Як було підкреслено на початку статті, більшість об'єктів вимірювальної техніки виявляється нелінійними та нестационарними. Одним з найбільш розповсюджених підходів до аналізу нестационарних процесів є аналіз систем із сигналами, які повільно змінюються у часі. Тоді приймається припущення, що на достатньо великих ділянках часу властивості об'єкта або процесу характеризуються лише незначною зміною і їх розглядають як стаціонарні та використовують класичні методи аналізу.

Сучасні канали збору даних працюють з високою швидкістю. Для таких умов вказані обмеження можна приймати лише у тих випадках, коли нестационарність характерна тільки для відносно низькочастотної області спектра у порівнянні з іншими частотами досліджуваного сигналу. В усіх інших випадках нестационарність повинна враховуватись у повній мірі, наприклад, із застосуванням таких методів як перетворення Гільберта (для методу аналітичного сигналу) або вейвлет-аналіз [3–4].

Вейвлет-перетворення забезпечує розділення даних (функцій, операторів) на складові з різними частотами, кожна з яких може аналізуватися з різним масштабом. Застосування вейвлетів дозволяє отримати

ти інформацію щодо процесів, які містять сигнали з часовою локалізацією, наприклад, імпульси з високою частотою на фоні періодичного сигналу (рис. 8).

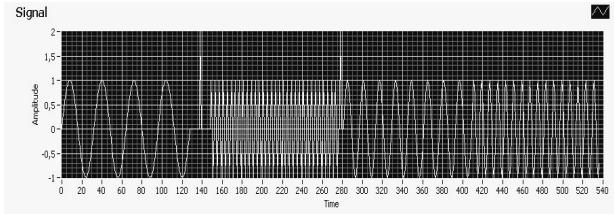


Рис. 8. Частотно-модульований сигнал 3, який містить викиди

Такий аналіз можна виконати і за допомогою віконного перетворення Фур'є [2], вірно підібравши ширину частотно-часового вікна (рис. 10).

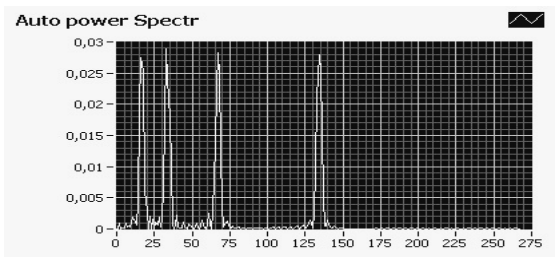


Рис. 9. Спектр потужності сигналу 3 для швидкого перетворення Фур'є

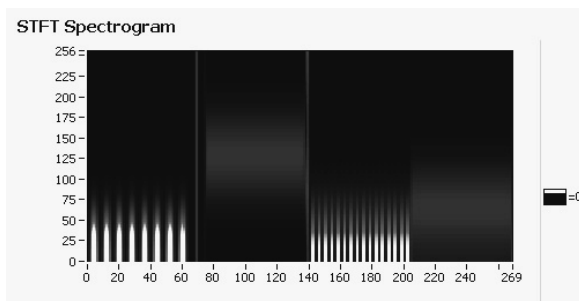


Рис. 10. Спектрограма для віконного перетворення Фур'є сигналу 3

Аналіз графіків спектру потужності сигналів (рис. 3, 6 та 9) дозволяє зробити висновок, що зміна послідовності частот сигналу та наявність різких імпульсних викидів не призводить до змін у спектрі потужності.

Це обумовлено тим, що локальні особливості сигналу (піки та розриви) при перетворенні Фур'є викликають незначну зміну в частотному представленні сигналу в інтервалі частот від $-\infty$ до ∞ та їх практично неможливо побачити у спектрі. Для застосування віконного перетворення Фур'є необхідно підібрати вірний частотно-часовий масштаб. При цьому потрібно враховувати принцип невизначеності: вузьке вікно надає добру розподільну здатність за часом, але погану в частотній області, і навпаки. На рис. 3, 6 чітко видно частоти сигналу, але таке вікно не дозво-

ляє побачити локальні особливості сигналу, які існують тільки в обмежені моменти часу. Покращення роздільної здатності за часом дозволяє побачити імпульсні викиди, але значно погіршує частотний аналіз періодичних складових (рис. 10).

Вейвлет-перетворення забезпечує виконання частотно-часового аналізу сигналу в чомусь аналогічному віконному перетворенню Фур'є, але має суттєві відмінності.

Для порівняння з перетворенням Фур'є (1) та віконним перетворенням Фур'є (2), розглянемо аналітичний опис вейвлет-перетворення (3) [4]

$$(T^{Wave} f)(a, b) = |a|^{-1/2} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt; \quad (3)$$

$$T_{m,n}^{Wave}(f) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int f(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt, \quad (4)$$

де ψ задовольняє умові $\psi(t)dt = 0$. Формула (4) застосовується у випадку дискретних a та b . Функції $\psi^{a,b}$ називають „вейвлетом“ (від англ. Wavelet – коротка хвиля).

Переваги застосування вейвлет-перетворення полягають у його здатності розподілення сигналу на такі складові:

- 1) грубу (апроксимуючу);
- 2) тонку (деталізуючу).

У подальшому ці складові можуть, у свою чергу, бути поділені для зміни рівня декомпозиції сигналу. Результатом вейвлет-перетворення є спектрограма. Розглянемо декілька простих прикладів вейвлет-перетворення з побудовою спектрограм (рис. 11).

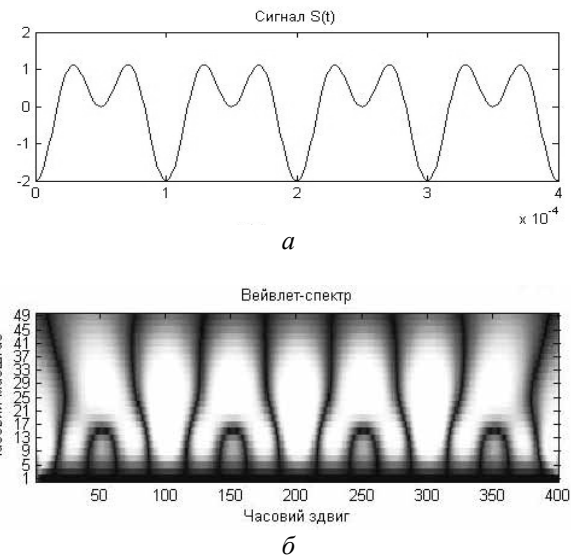


Рис. 11. Приклади вейвлет-перетворення періодичного сигналу: а – періодичний сигнал; б – вейвлет-спектр

На рис. 11, *а* показаний періодичний сигнал, який складається з двох гармонік, та його вейвлет-спектр (рис. 11, *б*). Нижня частина спектрограми відповідає гармоніці з більшою частотою, верхня – гармоніці з низькою частотою.

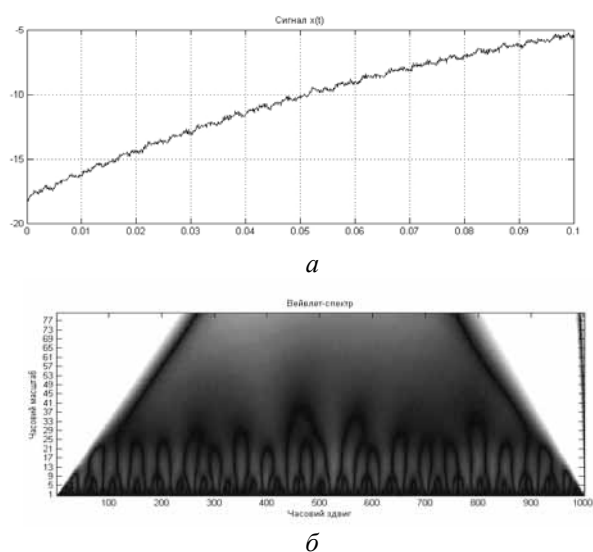


Рис. 12. Приклади вейвлет-перетворення неперіодичного сигналу: *а* – неперіодичний нестационарний сигнал; *б* – вейвлет-спектр

На рис. 12, *а* представлений більш складний випадок неперіодичного нестационарного сигналу. Він відображає певний аперіодичний перехідний процес, на який додатково впливають періодичні сигнали та шум. Для більш детального аналізу високочастотного шуму можна побудувати вейвлет-спектр тільки для малих значень часового масштабу (рис. 13.). На рис. 13 більш детально спостерігається нижня частина графіка з рис. 12, *б*.

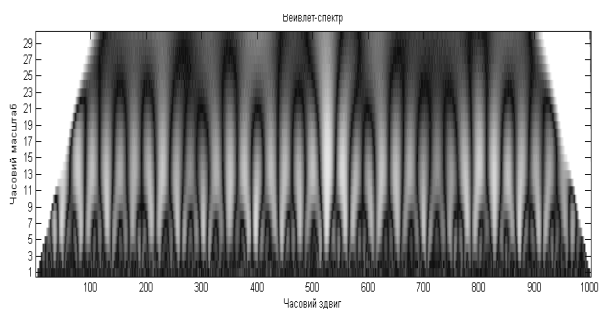


Рис. 13. Вейвлет-спектр для аналізу високочастотних складових сигналу

Високочастотні складові шуму можна побачити при часовому масштабі від 1 до 5. Далі міститься область, яка відображає наявність двох гармонічних складових. Білі трикутні області на спектрограмах (рис. 12, *б* та рис. 13) відповідають неперіодичним змінам сигналу (перехідний процес).

На рис. 14 показаний сигнал, який до моменту часу „1“ лінійно зростає, потім відбувається розрив сигналу, далі він лінійно зменшується. Усі вказані перетворення відбуваються на фоні шуму.

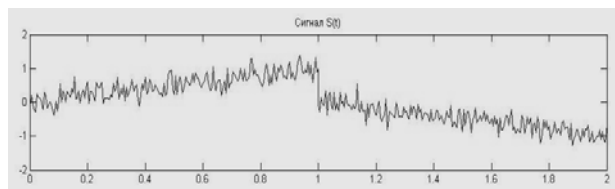


Рис. 14. Сигнал з розривом

Локальні особливості сигналу, показаного на рис. 14, чітко спостерігаються за допомогою вейвлет-спектру (рис. 15).

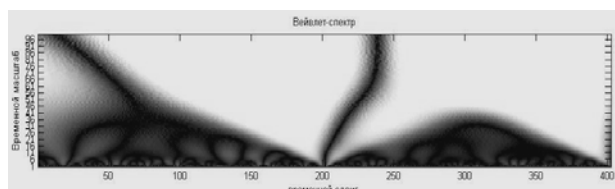


Рис. 15. Вейвлет-спектр сигналу з розривом

На графіку рис. 16 добре відображається наявність високочастотного шуму.

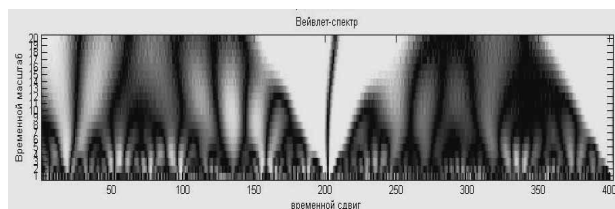


Рис. 16. Вейвлет-аналіз сигналу з розривом

На обох вейвлет-спектрах чорна вертикальна риска вказує на наявність розриву.

Висновки. У статті розглянуто особливості різних підходів до аналізу сигналів, що є типовими для інформаційно-виміральної техніки. Представлено порівняльні характеристики перетворення Фур'є, віконного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Виконані дослідження приводять до висновку, що немає єдиного універсального, найкращого для будь-якого випадку, підходу. Навіть такий новий та потужний інструмент як вейвлет-аналіз не здатний розрізнити ефекти амплітудної та частотної модуляції (наприклад, при наявності тільки амплітудної модуляції показує додаткові „ложні“ ефекти частотної та навпаки [5]). Тому, перш ніж обирати певний математичний апарат, дослідник повинен виконати попередню обробку сигналу та встановити до якого класу процесів його можна віднести (періодичний, неперіодичний, перехідний, нестационарний, з наявністю локальних особливостей тощо).

Список літератури / References

1. m-DAQ – микросистема сбора данных. Руководство пользователя. – К.: Холит™ Дэйта Системс. – 25 с.
m-DAQ – data collection micro system. Manual, KHolit™ Deyta Systems. Kyiv, Ukraine, 25 p.
2. Кехтарнаваз Н. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabView: пер. с

англ. / Кехтарнаваз Н., Ким Н. – М.: Изд. Дом „Додэка-XXI“, 2007. – 304 с.

Kehtarnavaz, N. and Kim, N. (2005), *Digital signal processing system-level design using LabVIEW*, Elsevier, 305 p.

3. Михалев А.И. Цифровая обработка данных: от Фурье к Wavelets / Михалев А.И. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 200 с.

Mikhalev, A.I. (2007), *Tsifrovaia obrabotka dannykh: ot Fourier k Wavelets* [Digital Data Processing: From Fourier to Wavelets], Sistemnyye tekhnologii, Dnepropetrovsk, Ukraine, 200 p.

4. Daubechies, I., 1992, “Ten lectures on wavelets”, *CBMS-NSF Conf. series in applied mathematics*, SIAM Ed., 458 p.

5. Sosnovtseva, O.V., Pavlov, A.N., Mosekilde, E. and Holstein-Rathlou, N. (2005), “Double-wavelet approach to studying the modulation properties of nonstationary multimode dynamics”, *Physiological Measurement*, Vol.26, pp. 351–362.

Цель работы. Наиболее распространенной схемой исследований свойств отдельных измерительных преобразователей или измерительных каналов в целом является применение спектрального анализа на основе преобразования Фурье. Этот математический аппарат имеет определенные ограничения при исследовании нестационарных и импульсных сигналов. При исследовании динамических свойств измерительных преобразователей актуально применение наряду с классическими методиками и других математических аппаратов, например вейвлет-анализа и оконного преобразования Фурье.

Методика исследований. Для исследования информационно-измерительных сигналов необходимо завести их в компьютер. С этой целью использована микросистема сбора данных m-DAQ с интерфейсом USB. Проанализированы различные частотно-модулированные сигналы в канале сбора данных и их спектры мощности, а также частотно-модулированный сигнал, содержащий выбросы, и его спектр мощности. Приведены спектрограммы оконного преобразования Фурье для каждого сигнала. С помощью вейвлет-преобразования проанализированы периодический сигнал, непериодический нестационарный сигнал, сигнал с разрывом.

Результат. Сделан вывод, что изменение последовательности частот сигнала и наличие резких импульсных выбросов не приводит к изменениям в спектре мощности для быстрого преобразования Фурье. Для непериодического нестационарного сигнала можно построить вейвлет-спектр как для малых значений временного масштаба, так и для высокочастотных составляющих шума при другом временном масштабе. Для сигнала с разрывом с помощью вейв-

лет-спектра четко наблюдаются локальные особенности сигнала.

Оценка результатов. Выполненные исследования приводят к выводу, что нет единого универсального, наилучшего для любого случая, подхода. Даже такой новый и мощный инструмент как вейвлет-анализ не способен различать эффекты амплитудной и частотной модуляции. Поэтому необходимо выполнять предварительную обработку сигнала и устанавливать, в какой класс процессов его можно отнести.

Ключевые слова: измерительные преобразователи, микросистема сбора данных, преобразование Фурье, нестационарность, вейвлет-преобразование

Background. The most common scheme for investigation of properties the some measuring transducers or measuring channels in general is the spectral analysis based on Fourier transform. This mathematical apparatus is inconvenient for study of non-stationary and pulsed signals. For study of dynamic properties of measuring transducers it is urgent to use alternative mathematical tools such as wavelet analysis and the window Fourier transform in addition to classic methods.

Methods. For study of information-processing signals it is necessary to input data into computer. Data capture microsystem m-DAQ with USB interface was used for this purpose. It was analyzed various frequency-modulated signals in the data collection channel and frequency-modulated signal with peaks and their power spectrums. Spectrograms of window Fourier transform for each signal were done. The periodic signal, non-stationary aperiodic signal and the signal with breaks were analyzed by means of wavelet transform.

Result. It is determined that signal frequency sequence change and the presence of sharp pulsed peaks does not lead to changes in the power spectrum for the fast Fourier transform. For non-stationary aperiodic signal a wavelet spectrum can be made for both small time values and high-frequency noise components in different time length. Wavelet spectrum gives the opportunity observe local features of the signal with breaks.

Conclusion. Research results showed that there is no single universal approach for any case. Even a new and powerful tool as wavelet analysis cannot differ the effects of amplitude and frequency modulation. That is why preprocessing is required for determination of type of the signal.

Keywords: measuring transformers, data capture microsystem, Fourier transformation, unstationarity, wavelet transformation

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунюм. Дата надходження рукопису 17.06.11