РАДІОТЕХНІЧНІ КОЛА ТА СИГНАЛИ

УДК 621.372.061:391.266

ПОГОДЖЕНА ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛІВ ПРИ ЗМІНІ МАСШТАБУ ЇХ АРГУМЕНТІВ НА БАЗІ НОРМАЛІЗОВАНИХ ВЕЙВЛЕТ ФУНКЦІЙ

Мельник А.Д., Рибін О.І.

Запропоновано метод нормалізації "за рівнем" тестового сигналу, з еквідистантним кроком дискретизації. Процедура нормалізації застосована до вейвлет перетворення, що дозволило виконати погоджену фільтрацію сигналів при зміні масштабу їх аргументів.

Вступ

Однією з важливих задач сучасної технічної діагностики є пошук сигналів (або їх графоелементів) певної, наперед заданої форми. Така задача є до того ж задачею класифікації та технічної діагностики, яку розв'язують порівнянням сигналів з тестовим в натуральних координатах, в області спектрів ортогональних перетворень (зокрема, шляхом погодженої лінійної фільтрації, косинусної фільтрації [1-3] тощо), порівнянням векторів суттєвих ознак сигналів і т. д. Одним зі зручних методів, які використовуються для порівняння спектрів сигналів, є нормалізація сигналу або (що те ж саме) трансформанти ортогонального перетворення тестовим сигналом [4-8]. Нормалізацію "за кроком" запропоновано в роботі [4] і розвинено в роботах [5-8]. Незручністю методу є нееквідистантний крок дискретизації при використанні нормалізованого перетворення. В роботі [9] було запропоновано нормалізацію "за рівнем", для якої крок дискретизації як сигналу, так і трансформант ортогональних перетворень залишається постійним, що й є головною позитивною властивістю нормалізації "за рівнем" у порівнянні з нормалізацією "за кроком".

В той же час головним недоліком обох методів нормалізації є необхідність нормування періоду, тобто приведення у відповідність інтервалу часу, на якому досліджується шуканий сигнал і сигнал тестовий (тривалості сигналів повинні бути рівні між собою і тотожні періоду, на якому існує трансформанта нормалізованого перетворення). На жаль, таке приведення періодів є досить складною задачею, необхідність розв'язання якої не дозволяє проводити аналіз подібності та відмін сигналів у реальному масштабі часу. Але задачу пошуку трансформант нормалізованого ("за рівнем") сигналу легко розв'язати за допомогою вейвлет перетворення, якщо його базовими функціями є нормалізовані трансформанти.

1. Застосування процедури нормалізації до вейвлет перетворення

Дискретне ортогональне перетворення, до якого ми застосовуємо нормалізацію, це вейвлет перетворення. В якості вейвлет оберемо найпростіший з відомих ортогональних вейвлетів – вейвлет Хаара. Рис.1 демонструє вейвлет Хаара для різних масштабів. Для простоти амплітуда вейвлетів вибрана однаковою. В подальшому головною для нас особливістю даного типу вейвлетів буде ортогональність, тому масштабним множником ми можемо в даному випадку знехтувати.

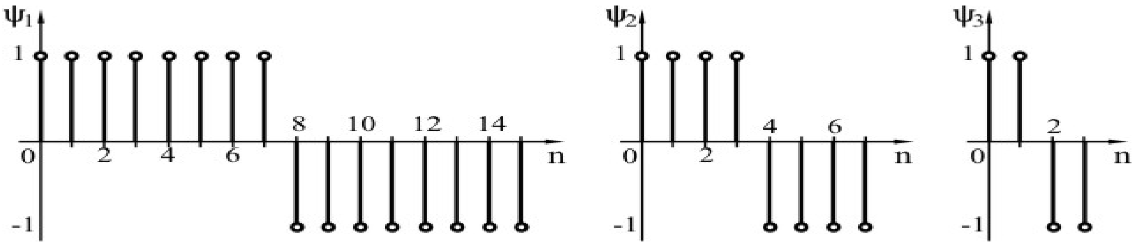


Рис.1. Вейвлет Хаара

Ортогональність даних вейвлетів є очевидною. Нагадаємо, ортогональними функції є в тому випадку, якщо виконується умова: $\sum_{n=0}^{N-1} \psi_l(n)\psi_m(n) = 0$, де N – довжина вейвлета, n – номер відіку. Результат обчислення суми дорівнює нулю, якщо $l \neq m$. Ширина і положення вейвлетів на часовій осі є кратномасштабною. Застосування в якості трансформант перетворення вейвлетів дозволяє знаходити сигнал, за яким виконувалась нормалізація (тестовий сигнал), не лише для одного (вихідного) масштабу, а і для кратних масштабів. Нагадаємо, що коефіцієнти вейвлет перетворення обчислюються як результат згортки сигналу, в даному випадку $s^{'}(n)$, з вейвлет функцією для кратних масштабів. Приклад вейвлетів з кратними масштабами наведено на рис.1. При цьому, щоб перекрити весь часовий інтервал, кількість “ширших” вейвлетів для більшого масштабу є вдвічі меншою, ніж кількість “вужчих” вейвлетів меншого масштабу. Розташування вейвлетів на часовій осі показане на рис.2.

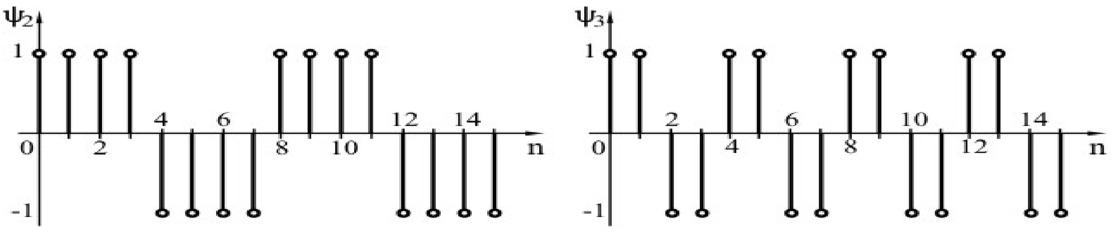


Рис.2. Покриття часового інтервалу вейвлетами різних масштабів.
(Масштаби відрізняються вдвічі)

Для наочності один вейвлет для кожного масштабу зображено товстою лінією. У випадку, коли сигнал, який досліджується, співпадає з тестовим сигналом, вейвлети для всіх масштабів по суті перемножуються з “нормалізованим” вейвлетом, тобто вейвлетом, під який був “лаштований” тестовий сигнал. Тому результат обчислення площі під кривою, яка є результатом множення вейвлетів, а в дискретному випадку – сумою множення відліків, буде нуль. Тобто, в разі співпадіння тестового сигналу і сигналу, який досліджується, всі вейвлет коефіцієнти будуть дорівнювати нулю. Ненульовим буде лише один вейвлет коефіцієнт. Цей коефіцієнт визначається як результат обчислення суми множення відліків вейвлета, під який підстроєний сигнал, на сигнал, що досліджується, так як цей сигнал має такий же вигляд, як і вейвлет. Тобто ненульовий коефіцієнт – це результат обчислення суми відліків квадрату вейвлета, для якого проводилася нормалізація.

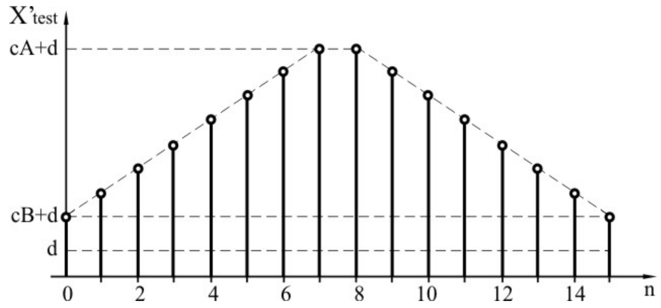


Рис.3 Тестовий сигнал, множений на константу з додатковою постійною складовою

На практиці може виникнути ситуація, коли сигнал, який досліджується, відрізняється від тестового на масштабний множник або містить "додаткову" постійну складову (див. рис.3). Цей сигнал, змінений за допомогою масштабного множника і складової, є тим сигналом, який нам потрібно знайти при обробці. Якщо в якості тестового сигналу виступають елементи зображення, то зміна на масштабний множник відповідає зміні контрасту зображення, а додаткова постійна складова впливає на яскравість, тобто розбавленість зображення білим. Для того, щоб такий сигнал в результаті виконання нормалізованого вейвлет перетворення був визнаний за тестовий (тобто, щоб всі вейвлет коефіцієнти були рівні нулю, ненульовий коефіцієнт лише для вейвлета, по якому проводилося прилаштовування сигналу), потрібно перетворити динамічний діапазон сигналу, що досліджується, на діапазон тестового. Для цього обчислюється різниця максимального і мінімального значень тестового сигналу Δ_{test} і сигналу, який досліджується, Δ_{proc}. В нашому випадку $\Delta_{test}=A-B$, а $\Delta_{proc}=cA+d-cB-d=c(A-B)$. Далі потрібно відняти від значень кожного відліку сигналу значення першого відліку. Результат перетворення наведено на рис.4

Наступним кроком є множення кожного відліку сигналу, що обробляється, на значення $1/c$, де значення $c=\Delta_{proc}/\Delta_{test}$. Таким чином ми отримаємо тестовий сигнал, до якого потрібно додати значення першого відліку тестового сигналу.

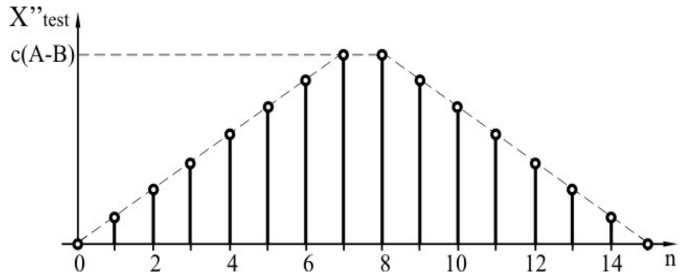


Рис.4

У випадку, коли сигнал, що досліджується, не є перемасштабованою версією тестового сигналу з додатковою постійною складовою, результат вищенаведених операцій дасть сигнал, відмінний від тестового. Результатом його вейвлет претворення буде послідовність ненульових коефіцієнтів.

Метою застосування процедури нормалізації є оцінка "схожості" сигналу, що оброблюється на тестовий сигнал. Кількісною мірою, за допомогою якої можна оцінити міру "схожості" сигналу, що оброблюється, і тестового сигналу є коефіцієнт трансформант. Обчислити даний коефіцієнт можна як: $K_{tr} = \dfrac{\sqrt{\sum T^2}}{\sqrt{T_{test}^{\ 2}}}$, де T_{test} – значення вейвлет коефіцієнту, отримане з сигналу при згортці з вейвлетом, під який був підлаштований сигнал, ΣT^2 – сума квадратів всіх інших вейвлет коефіцієнтів.

Таким чином, чим сигнал, що досліджується, більш схожий на тестовий, тим значення коефіцієнту трансформант є меншим. В ідеальному випадку значення коефіцієнта трансформант при співпадінні тестового сигналу і сигналу, що оброблюється, дорівнює нулю, оскільки сума всіх інших вейвлет коефіцієнтів дорівнює нулю.

Для оцінки подібності і відмін сигналів будемо (для зручності сприйняття) використовувати величину $1/K_{tr}$, яку назвемо гостротою. Чим подібніший сигнал, який досліджується, до тестового, тим гострота є більшою.

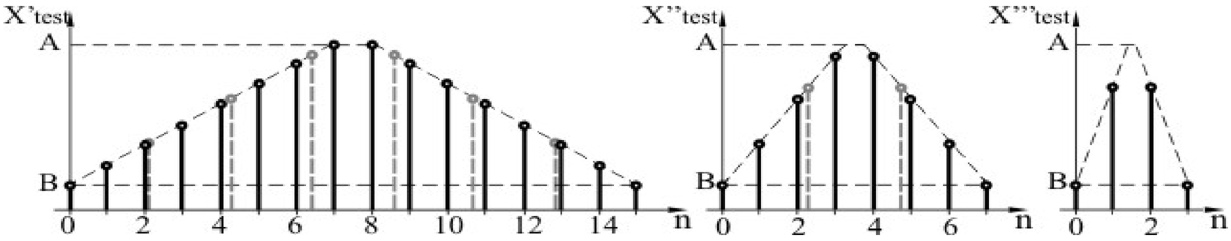
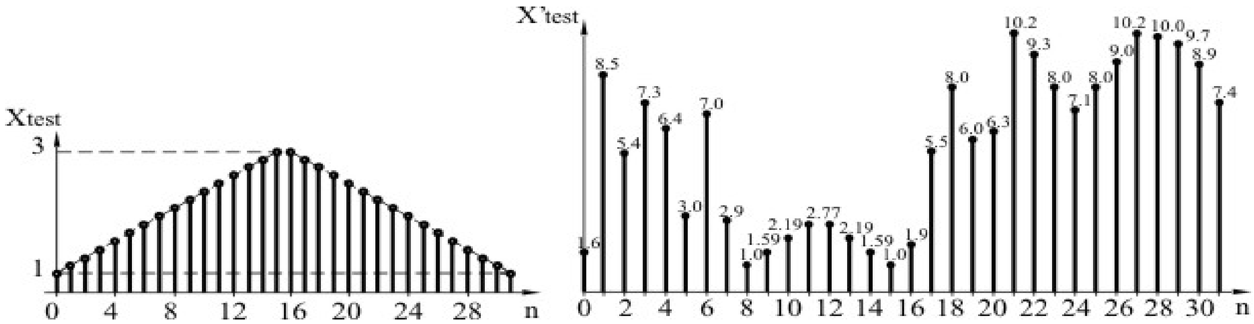


Рис.5. Тестові сигнали різних масштабів

Як вже зазначалося, особливістю нормалізації вейвлет перетворення, є можливість оцінювати "схожість" тестового сигналу і сигналу, що аналізується, для різних масштабів. Точніше, для кратних масштабів. Рис.5 демонструє тестові сигнали різних масштабів. Для обчислення значень відліків перемасштабованих тестових сигналів ми застосовуємо лінійну інтерполяцію. Процедура інтерполювання значень відліків вихідного сигналу x'_{test} для отримання зменшеної (в даному випадку - вдвічі) копії x''_{test} є наступною. Спочатку визначаємо моменти часу, в які існують відліки сигналу x''_{test} (визначаємо крок дискретизації). Зробити це нескладно тому, що крок дискретизації вихідного сигналу і масштабованого є еквідистантним: для сигналу x''_{test} інтервал дискретизації становить $(N–1)/(M–1)$, де N і M кількість відліків сигналу x'_{test} і x''_{test} відповідно. Відліки сигналу (з отриманим кроком дискретизації) показані на рис.6 пунктирною лінією сірого кольору (графік сигналу x'_{test}). Амплітуда відліків сигналу x''_{test} визначається огинаючою сигналу x'_{test}. В свою чергу огинаюча є лінією, яка з'єднує сусідні відліки (пунктир чорного кольору на рис.5). Тобто, значення кожного відліку сигналу x''_{test} визначається значенням огинаючої сигналу x'_{test} в момент часу, коли даний відлік x''_{test} існує (див. рис.5). Аналогічно знаходимо відліки сигналу x'''_{test}.

2. Застосування нормалізованого вейвлет перетворення для погодженої фільтрації сигналів при кратномасштабній зміні аргументів

Таким чином, щоб оцінити сигнал, що досліджується, на "відповідність" тестовому, потрібно: обчислити корегуючі коефіцієнти для всіх тестових сигналів (тобто, для різних масштабів); виконати нормалізацію (тобто, підлаштування тестового сигналу під вейвлет обраного масштабу) для всіх сигналів; виконати вейвлет перетворення тестового сигналу для кожного масштабу; для кожного з масштабів, обчислити коефіцієнт трансформант. За отриманими значеннями коефіцієнтів трансформант (кількість обчислень коефіцієнта трансформант дорівнює кількості масштабів тестового сигналу, який ми шукаємо) можна зробити висновок про "схожість" сигналу, що досліджується, на тестовий сигнал.



а) б)

Рис.6 Тестовий сигнал (а) та сигнал, який досліджується на подібність до тестового (б).

За допомогою нормалізованого вейвлет перетворення і подальшого обчислення гостроти шукаємо в сигналі (рис.6б) тестовий сигнал (рис.6а) і його масштабовані версії зменшеної тривалості (відповідно 16,8,4 відліки). Сигнал (рис.6б) містить масштабовану версію тестового сигналу (рис.6а),

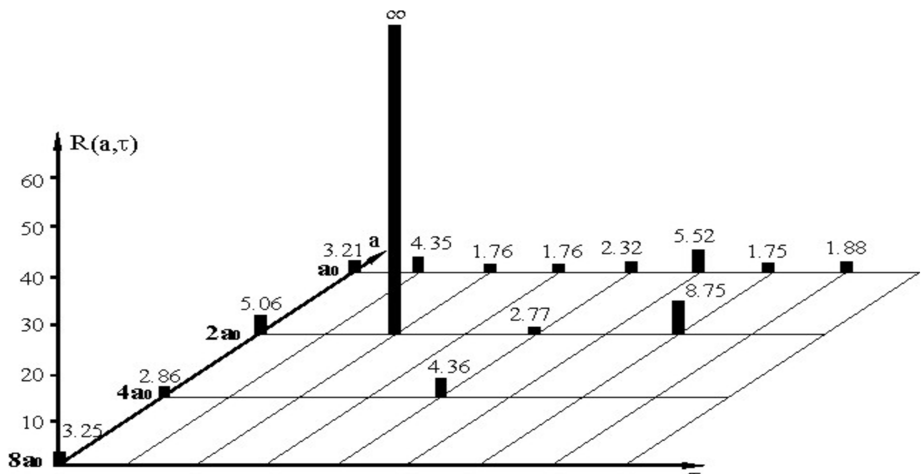


Рис.7 Скейлограма гостроти

а відліки з восьмого по п'ятнадцятий – зменшена за тривалістю (8 відліків) копія тестового сигналу. В нашому випадку гострота є функцією двох аргументів – масштабу "а" (обраного вейвлета) і зсуву "τ" (обраного вейвлета) по осі часу. За допомогою обчислення значення гостроти для конкретного значення масштабу і зсуву ми оцінюємо “схожість” фрагмента досліджуваного сигналу (з конкретним значенням масштабу і зсуву) з тестовим.

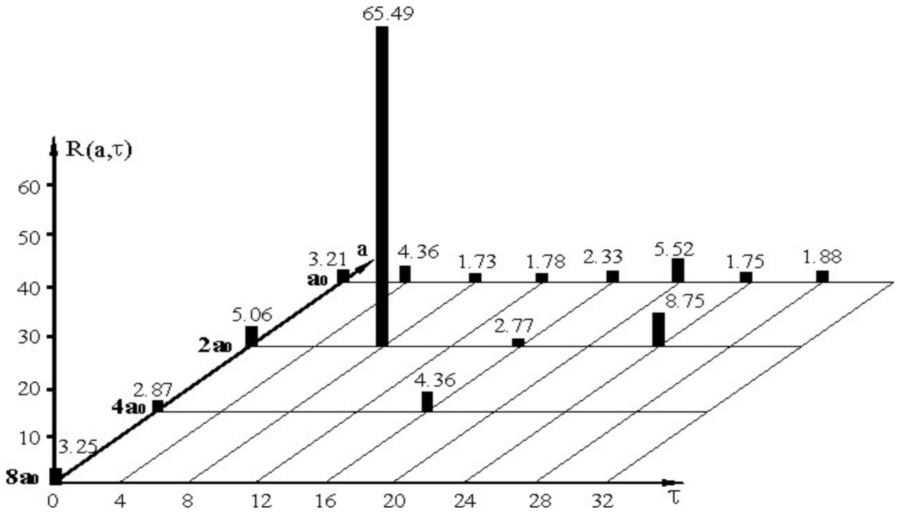


Рис.8. Скейлограма гостроти

З рис. 7 видно, що максимум гостроти розташований при масштабі $2a_0$, де a_0 відповідає вейвлету з довжиною 4 відліки (тобто $2a_0$ відповідає вейвлету з довжиною 8 відліків) і з значенням зсуву, який дорівнює 8. Це означає, що фрагмент сигналу рис.6б, який починається з восьмого відліку і має довжину 8 відліків і є тестовим сигналом. Тобто з скейлограми гостроти можна визначити положення (зсув) і масштаб фрагменту сигналу, який є подібним до тестового.

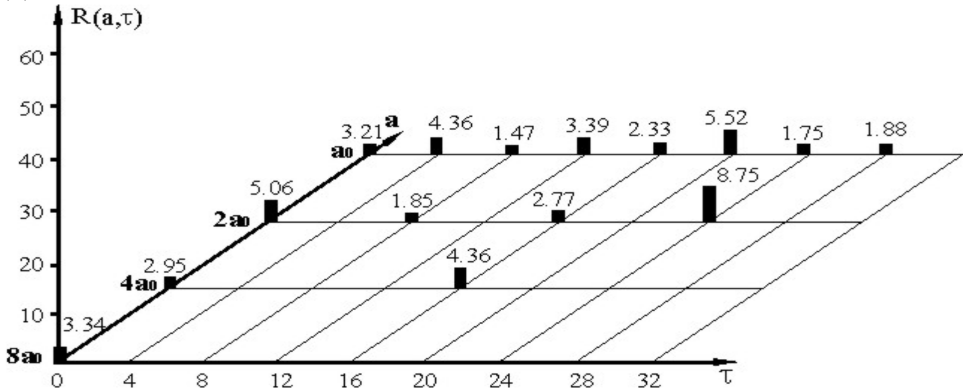


Рис.9. Скейлограма гостроти

Для сигналу, що наведений на рис.6б з адитивним шумом (σ=0.193*В*), скейлограма гостроти зображена на рис.8. Шум доданий до відліків з 8-го по 15-ий. Значення відліків шуму наведено в табл. 1.

Таблиця 1

n	0	1	2	3	4	5	6	7
N(*n*)	0.05	-0.11	-0.03	0.08	0.1	-0.06	0.05	0.03

Для сигналу рис. 6б, де значення відліків з 8-го по 15-й змінені на значення з табл. 2, скейлограма гостроти має вигляд як на рис.9.

Таблиця 2

n	0	1	2	3	4	5	6	7
$x(n)$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4

Висновки

Запропонована нормалізації вейвлет перетворення не використовує нееквідистантні відстані при обчисленні; підлаштовується не трансформанта перетворення (вейвлет обраного масштабу) під сигнал, а сигнал під трансформанту; інформація про відмінність тестового сигналу від трансформанти зберігається в корегуючих коефіцієнтах; можна працювати з кратномасштабними тестовими сигналами.

Література

1. Schwartz M., Shaw L. Signal processing, discrete spectral analysis, detection and estimation. – MacGraw-Hill. – Tokyo, 1975.
2. Haykin S. Digital communication. – J. Willey & Sons Inc. – 1988.
3. Ян И. Нелинейные согласованные фильтры для анализа различий // Радиоэлектроника. – 1999. - №6. – С.51-58.
4. Рыбин А.И. Нормализация дискретных ортогональных преобразований тестовым сигналом // Радиоэлектроника. – 2004. - №7. – С.39-46.
5. Рыбин А.И., Григоренко Е.Г. Алгоритм подстройки дискретного ортогонального преобразования под тестовый сигнал // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування. – 2004. - №27. – С.122-128.
6. Рибін О.І., Шарпан О.Б. Діагностичні можливості процедури нормалізації ортогональних функцій при аналізі пульсограм // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2004. – т.1. - №4. – С.144-149.
7. Рибін О.І., Сакалош Т.В., Шарпан О.Б. Аналіз пульсограм на базі процедури нормалізації ортогональних перетворень REX //Наукові вісті НТУУ "КПІ".2005. №4. С.29-33.
8. Рыбин А.И., Шарпан О.Б., Григоренко Е.Г., ін. Коэффициенты трансформант нормализованных ортогональных преобразований и диагностика пульсограмм // Вісник НТУУ "КПІ". – Серія - Приладобудування. – 2005. – Вип.30. – С.148-156.
9. Мельник А.Д., Рибін О.І. Нормалізація тестового сигналу зі збереженням еквідистантного кроку дискретизації//Вісник НТУУ "КПІ". Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування". 2007. Вип.34.

Мельник А.Д., Рыбин А.И. **Согласованная фильтрация сигналов при изменении масштаба их аргументов на базе нормализованных вейвлет функций** Предложен метод нормализации "по уровню" тестового сигнала, позволяющий осуществить согласованную фильтрацию сигналов при изменении масштаба их аргументов.	Melnyk A.D., Rybin O.I. **The coordinated filtration of signals at change of scale of their arguments on the basis of normalized вейвлет of functions** The method of normalization " on a level " of the test signal allowing carrying out coordinated filtration of signals, with change of scale of their arguments is offered.