УДК 681.3

В.С. Якушев
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра “Інформаційні системи та мережі”

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ КОМБІНОВАНИХ АЛГОРИТМІВ ПРИ ПЕРЕТВОРЕННІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ

Research results about fast converting series stability and immunity during acquisition and transformations of periodic signals informational parameters are presented in this paper.

Досліджується завадостійкість швидкозбіжних рядів при використанні для перетворення і виділення інформаційних параметрів періодичних сигналів.

Процес перетворення й опрацювання вхідних потоків даних в інформаційних системах, у першу чергу в їх первинних та вторинних ланках, здійснюється над фізичними величинами різної природи [1], до яких належать сигнали.

Під сигналом у загальному випадку розуміють фізичний процес, що є носієм деяких відомостей як інформаційного, так і неінформаційного характеру [2]. Інформаційним параметром вхідного сигналу загалом вважають параметр процесу, який функціонально пов’язаний з величиною, що перетворюється. Неінформаційний параметр може бути функціонально пов’язаний або не пов’язаний з величиною, що перетворюється, однак він може викликати небажані зміни інформаційного параметра вихідного сигналу, який пов’язаний з величиною, що перетворюється.

Тобто різні фізичні сигнали можна описати загальною математичною моделлю [1]:

$$X = F\left[F_1\left(t_i, x_1, ..., x_n, q_1, ..., q_m\right); F_2\left(t_j, q_1^{'}, ..., q_m^{'}\right)\right],$$

де t_i, t_j – основний незалежний параметр сигналу X, у нашому випадку час; $x_1, ..., x_n$ – інформаційні параметри сигналу X, що функціонально з ним пов’язані; $q_1,,,, q_m$ та $q_1^{'}, ..., q_m^{'}$ – неінформаційні параметри сигналу X, що функціонально з ним пов’язані і не пов’язані, відповідно.

Традиційно відомі методи та відповідний математичний апарат для виділення, перетворення та опрацювання інформаційних параметрів вхідних сигналів на високому науково-технічному рівні сьогодні набули значного поширення [2,3], зокрема це такі математичні методи, як ряди Фур’є, Тейлора, Лорана, інтеграл Фур’є, інтегральні рівняння Фредгольма, Вольтера, елементи теорії різниць, операційні методи Хевісайда, перетворення Лапласа, теорія ймовірностей, а також елементи теорії лінійних та квадратичних форм.

До вимірювальних методів, окрім загальновідомих, належать методи екстраполяції, методи камерального опрацювання інформації та методи трансмурусних вимірів. Для вимірювальних цілей використовуються також такі методи моделювання, як методи Рітца, Бубнова-Гальоркіна та інші.

Інформаційні параметри, в основному, функціонально не пов'язані з деяким фізичним сигналом, виділяються з використанням різних методів фільтрації, з використанням теорії спектральних випадкових функцій, теорії Вінера для стаціонарно пов'язаних випадкових функцій.

Одночасно з подальшим розвитком відомих методів триває пошук нових, особливо нового математичного апарата, їх дослідження та оцінка щодо практичного використання [4–6].

Метою цієї роботи є застосування апарата швидкозбіжних рядів, розроблених комбінованих алгоритмів [5], дослідження та оцінення завадостійкості цих алгоритмів при перетворенні інформаційних параметрів вхідних сигналів.

Зазначимо, що відповідно до основних фізичних процесів сигнали поділяють на механічні, електричні, магнітні, теплові, акустичні, оптичні, іонізуючого випромінювання [2, 3], а за характером їх зміни у часі – на умовно незмінні (постійні) та змінні (випадкові, детерміновані, квазідетерміновані).

При перетворенні постійних сигналів сьогодні не виникає суттєвих проблем на відміну від змінних, які мають складну природу.

Випадкові (стохастичні) сигнали підпорядковуються законам випадку і можуть бути описані їх статистичною структурою (спектр щільності потужності, закон розподілу). Їх поведінку у часі неможливо описати окремим математичним виразом, тобто наперед визначити характер.

Випадкові сигнали, у свою чергу, поділяються на стаціонарні та нестаціонарні, а стаціонарні – на ергодичні та неергодичні.

Поведінка детермінованих сигналів може бути описана окремим математичним виразом типу

$$E(t) = f(t).$$

Навіть коли $f(t)$ – складна функція, поведінка $E(t)$ визначена і миттєве значення сигналу може бути вирахувано наперед для будь-якого потрібного моменту часу. Тобто такий сигнал не є інформативно спотвореним.

Детерміновані сигнали можуть бути стаціонарними і нестаціонарними, а стаціонарні відповідно періодичними і неперіодичними.

До квазідетермінованих відносять сигнали з частково відомим характером зміни у часі, тобто з одним або декількома невідомими параметрами. Невідомі параметри, зазвичай, вважають випадковими величинами. Синусоїдальні сигнали, наприклад, з відомою частотою і постійною, але невідомою амплітудою (або навпаки) прийнято класифікувати як квазідетерміновані.

Для досягнення вказаної мети дослідимо завадостійкість комбінованого алгоритму на прикладі його застосування для перетворення (вимірювання) достатньо поширених квазідетермінованих періодичних сигналів, їх частотних характеристик. При цьому частотні характеристики вказаного сигналу віднесемо до інформаційних параметрів, а до неінформаційних – його девіацію внаслідок накладення завад промислової частоти.

Приймемо формулу корисного сигналу:

$$a = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right),$$

де $A \equiv U; I$.

Тоді формула сигналу завади:

$$a_n = A_n \sin\left(\frac{2\pi}{T_n} t + \varphi\right),$$

де $A_n \equiv U_n; I_n; \varphi$ – фазовий зсув сигналу завади щодо корисного сигналу.

Для знаходження точок переходу через нуль деякого сумарного сигналу, прирівняємо вирази для корисного сигналу та сигналу завади:

$$A\sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) + A_n \sin\left(\frac{2\pi}{T_n} t + \varphi\right) = 0. \tag{1}$$

Для перетворення (1) використаємо два перші члени розкладу в ряд Маклорена:

$$\begin{aligned} &A\left\{\sin\frac{2\pi}{T}t_0 + \frac{2\pi}{T}\left(\cos\frac{2\pi}{T}t_0\right)(t-t_0)\right\} + \\ &+ A_n\left\{\sin\left(\frac{2\pi}{T_n}t_0 + \varphi\right) + \frac{2\pi}{T_n}\left[\cos\left(\frac{2\pi}{T_n}t_0 + \varphi\right)\right]\cdot(t-t_0)\right\} = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Максимальна абсолютна похибка наближення рівняння (1) до рівнянь (2) дорівнює сумі залишкових членів у формі Лагранжа як для корисного сигналу, так і для сигналу завади, в нашому випадку [7]:

$$\begin{aligned} &\Delta^{c}_{абс} + \Delta^{n}_{абс} = \left|\frac{1}{2!}\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}\theta\right)(t-t_0)^2\right| + \left|\frac{1}{2!}\left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2\left[\sin\left(\frac{2\pi}{T_n}\theta + \varphi\right)\right](t-t_0)^2\right| < \\ &< \left|\frac{1}{2!}\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 (t-t_0)^2\right| + \left|\frac{1}{2!}\left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 (t-t_0)^2\right|, \end{aligned} \tag{3}$$

де $t_0 < \theta < t$.

Внаслідок того, що досліджується завадостійкість комбінованого алгоритму, на цьому етапі є важливим закон зміни частоти корисного сигналу (девіація), а не те, з якою точністю цей закон заданий, тобто двох перших членів розкладу в ряд Маклорена досить для задання девіації частоти корисного сигналу.

З (2) виведемо вираз для точок переходу через нуль отриманого сумарного сигналу при $t_0 = 0; t_0 = T; t_0 = 2T; ...; t_0 = nT$. Позначимо лінійні координати цих точок відповідно $t^{(0)}, t^{(1)}, t^{(2)}, ..., t^{(n)}$.

1. $t_0 = 0$.

$$A\left\{\frac{2\pi}{T}\right\} + A_n\left\{\sin\varphi + \frac{2\pi}{T_n} t\cos\varphi\right\} = 0,$$

$$t^{(0)} = -\frac{A_n \sin\varphi}{2\pi\left(\frac{A}{T} + \frac{A_n}{T_n}\cos\varphi\right)} = -\frac{T \cdot T_n \sin\varphi}{2\pi\left(\frac{A}{A_n}T_n + T\cos\varphi\right)}.$$

2. $t_0 = T$.

$$A\left\{\frac{2\pi}{T}(t-T)\right\}+A_n\left\{\sin\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)+\frac{2\pi}{T_n}\left[\cos\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)\right](t-T)\right\}=0.$$

$$t^{(1)}=\frac{2\pi A-A_n\sin\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)+2\pi A_n\frac{T}{T_n}\cos\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}{2\pi\frac{A}{T}+2\pi\frac{A_n}{T_n}\cos\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}=$$

$$=\frac{\left[2\pi A+2\pi A_n\frac{T}{T_n}\cos\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)\right]-A_n\sin\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}{\frac{1}{T}\left[2\pi A+2\pi A_n\frac{T}{T_n}\cos\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)\right]}=$$

$$=T\left[1-\frac{\sin\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}{2\pi\frac{A}{A_n}+2\pi\frac{T}{T_n}\cos\left(2\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}\right].$$

3. $t_0 = 2T$.

$$A\left\{\frac{2\pi}{T}(t-2T)\right\}+A_n\left\{\sin\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)+\frac{2\pi}{T_n}\left[\cos\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)\right](t-2T)\right\}=0.$$

$$t^{(2)}=\frac{4\pi A-A_n\sin\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)+4\pi A_n\frac{T}{T_n}\cos\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}{2\pi\frac{A}{T}+2\pi\frac{A_n}{T_n}\cos\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}=$$

$$=\frac{2\left[2\pi A+2\pi A_n\frac{T}{T_n}\cos\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)\right]-A_n\sin\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}{\frac{1}{T}\left[2\pi A+2\pi A_n\frac{T}{T_n}\cos\left(4\pi\frac{T}{T}+\varphi\right)\right]}=$$

$$=T\left[2-\frac{\sin\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}{2\pi\frac{A}{A_n}+2\pi\frac{T}{T_n}\cos\left(4\pi\frac{T}{T_n}+\varphi\right)}\right].$$

У загальному вигляді для $t_0 = nT$

$$t_n = T\left[n - \frac{\sin\left(n \cdot 2\pi \dfrac{T}{T_n} + \varphi\right)}{2\pi \dfrac{A}{A_n} + 2\pi \dfrac{T}{T_n} \cos\left(n \cdot 2\pi \dfrac{T}{T_n} + \varphi\right)}\right]. \tag{4}$$

На основі зроблених розрахунків вирази для періодів, що послідовно оцінюються, набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} T_{x_1} &= t^{(1)} - t^{(0)}, \\ T_{x_2} &= t^{(2)} - t^{(1)}, \\ &\vdots \\ T_{x_n} &= t^{(n)} - t^{(n-1)}. \end{aligned} \tag{5}$$

Оскільки комбінований алгоритм дає суттєвий виграш в області низьких та інфранизьких частот, цікавим є дослідження результату зміни таких частот (Гц): 0,1; 0.5; 1; 3; 5; 7; 9; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800; 850; 900; 950; 1000 Гц при накладанні завад промислової частоти 50 та 400 Гц.

При цьому реальними є такі фазові зсуви сигналу завади щодо корисного сигналу – $\varphi = 0^o$, 30^o, 45^o, 60^o, 75^o, 90^o і амплітудні співвідношення $\dfrac{A}{A_n}$: 1; 3; 5; 7; 9; 10; 30; 50; 100.

Перш ніж оцінювати завадостійкість комбінованого алгоритму, оцінимо завадостійкість його складових, тобто першого алгоритму Остроградського і алгоритму Енгеля. За першим алгоритмом Остроградського періоди деякого періодичного сигналу, що оцінюється, запишуться

$$\begin{aligned} T_{x_1} &= N_1 t_0 + t_1, \\ T_{x_2} &= N_2 t_1 + t_2, \\ &\vdots \\ T_{x_n} &= N_n t_{n-1} + t_n, \end{aligned} \tag{6}$$

де $N_1, N_2, ..., N_n$ – цілі числа, що вказують, скільки разів залишки $t_0, t_1, ..., t_{n-1}$ вкладаються у відповідних періодах $T_{x_1}, T_{x_2}, ..., T_{x_n} \left(t_0 > t_1 > ... > t_n\right)$ з недостачею; t_n – останній залишок, що є нехтівно малим порівняно із заданою точністю перетворення. Для оцінення завадостійкості необхідно визначити такі співвідношення:

$$F_1 = \frac{1}{N_1} T_{x_1} - \frac{1}{N_1 N_2} T_{x_2} + ... + (-1)^{(n-1)} \frac{1}{N_1 N_2 ... N_n} T_{x_n}; \tag{7}$$

$$F_2 = \left(\frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_1 N_2} + ... + (-1)^{(n-1)} \frac{1}{N_1 N_2 ... N_n}\right) T_{x_0}; \tag{8}$$

$$F_3 = \frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_1 N_2} + ... + (-1)^{(n-1)} \frac{1}{N_1 N_2 ... N_n}. \tag{9}$$

Оцінені за алгоритмом Енгеля періоди запишуться як

$$\begin{aligned} T_{x_1} &= p_1 t_0^{'} - t_1^{'}, \\ T_{x_2} &= p_2 t_1^{'} - t_2^{'}, \\ &\vdots \\ T_{x_n} &= p_n t_{n-1}^{'} - t_n^{'}, \end{aligned} \tag{10}$$

де $p_1, p_2, ..., p_n$ – цілі числа, які вказують, скільки разів залишки $t_0^{'}, t_1^{'}, ..., t_{n-1}^{'}$ вкладаються у відповідних періодах $T_{x_1}, T_{x_2}, ..., t_{x_n}\left(t_0^{'} > t_1^{'} > ... > t_n^{'}\right)$ з надлишком; $t_n^{'}$ – останній залишок, який є нехтівно малим порівняно з заданою точністю перетворення.

Для оцінення завадостійкості необхідно визначити такі співвідношення:

$$F_1^{'} = \frac{1}{p_1} T_{x_1} + \frac{1}{p_1 p_2} T_{x_2} + ... + \frac{1}{p_1 p_2 \cdots p_n} T_{x_n}; \tag{11}$$

$$F_2^{'} = \left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_1 p_2} + ... + \frac{1}{p_1 p_2 \cdots p_n} \right) T_{x_0}; \tag{12}$$

$$F_3^{'} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_1 p_2} + ... + \frac{1}{p_1 p_2 \cdots p_n}. \tag{13}$$

Далі перейдемо до оцінювання комбінованого алгоритму. За комбінованим алгоритмом періоди, що оцінюються, запишуться:

$$\begin{aligned} T_{x_1} &= R_1 \overline{t_0} + (-1)^{1+\varepsilon_0} \overline{t_1}; \\ T_{x_2} &= R_2 \overline{t_1} + (-1)^{1+\varepsilon_1} \overline{t_2}; \\ &\vdots \\ T_{x_n} &= R_n \overline{t_{n-1}} + (-1)^{1+\varepsilon_{n-1}} \overline{t_n}, \end{aligned} \tag{14}$$

де послідовність чисел $\varepsilon_0, \varepsilon_1, ..., \varepsilon_{n-1}$ визначається як $\varepsilon_i = 1$, якщо перший крок здійснюється з недостачею та $\varepsilon_i = 0$, якщо з надлишком, тобто виконується крок за Остроградським або за Енгелем відповідно. Іншими словами, якщо $t_1 \le t_1^{'}$, то перший крок комбінованого оцінення виконується з недостачею, $T_{x_1} = R_1 \overline{t_0} + \overline{t_1}$, де величина R_1 еквівалентна N_1; якщо $t_1 \ge t_1^{'}$, то з надлишком – $T_{x_1} = R_1 \overline{t_0} - \overline{t_1}$, де величина R_1 еквівалентна p_1. Для оцінення завадостійкості комбінованого алгоритму необхідно визначити такі співвідношення:

$$\begin{aligned} \overline{F_1} &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{1+\varepsilon_0+\varepsilon_1+...+\varepsilon_{i-1}}}{R_1 R_2 ... R_i} T_{x_i} = \\ &= (-1)^{1+\varepsilon_0} \frac{1}{R_1} T_{x_1} + (-1)^{1+\varepsilon_0+\varepsilon_1} \frac{1}{R_1 R_2} T_{x_2} + ... + (-1)^{1+\varepsilon_0+\varepsilon_1+,,,+\varepsilon_{n-1}} \frac{1}{R_1 R_2 ... R_n} T_{x_n}; \end{aligned} \tag{15}$$

$$\overline{F_2} = \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{1+\varepsilon_0+\varepsilon_1+...+\varepsilon_{i-1}}}{R_1 R_2 ... R_i} \right) T_{x_0} =$$

$$= \left[(-1)^{1+\varepsilon_0} \frac{1}{R_1} + (-1)^{1+\varepsilon_0+\varepsilon_1} \frac{1}{R_1 R_2} + ... + (-1)^{1+\varepsilon_0+\varepsilon_1+...+\varepsilon_{n-1}} \frac{1}{R_1 R_2 ... R_n} \right] T_{x_0}; \tag{16}$$

$$\overline{F_3} = (-1)^{1+\varepsilon_0} \frac{1}{R_1} + (-1)^{1+\varepsilon_0+\varepsilon_1} \frac{1}{R_1 R_2} + ... + (-1)^{1+\varepsilon_0+...+\varepsilon_{n-1}} \frac{1}{R_1 R_2 ... R_n}. \tag{17}$$

Для порівняння результатів оцінення спотвореного завадою корисного сигналу і неспотвореного (без впливу завади) необхідно знайти значення функцій $F_2, F_2^{'}, \overline{F_2}$ за відповідними виразами (8), (12), (16) для випадку, коли $T_{x_0} = T_{x_1} = T_{x_2} = ... = T_{x_n}$. У цьому випадку періоди визначаються безпосередньо з частоти корисного сигналу.

При проведених дослідженнях перші залишки $t_0, t_0^{'}, \overline{t_0}$ відповідно при оціненні за алгоритмами Остроградського, Енгеля і комбінованому вибирались відразу меншими $\frac{1}{2}T$ за корисний сигнал, наприклад, менші на $\frac{1}{10}T$, тобто

$$t_0 = t_0^{'} = \overline{t_0} = \frac{1}{2}T - \frac{1}{10}T.$$

При оціненні за виразами (7), (8), (9), (11), (12), (13), (15), (16), (17) при недосягненні певної збіжності слід обмежитись десятьма членами розкладу. У виразах (8), (12), (16) період T_{x_0} у загальному вигляді дорівнює

$$T_{x_0} = \frac{T_{x_1} + T_{x_2} + ... + T_{x_i}}{i},$$

де i – кількість членів розкладу (ітерацій).

Для десяти ітерацій, якщо не буде досягнута певна збіжність, вираз для T_{x_0} набуде вигляду

$$T_{x_0} = \frac{T_{x_1} + T_{x_2} + ... + T_{x_{10}}}{10}.$$

У процесі досліджень після кожного оцінення за виразами (7), (8), (9), (11), (12), (13), (15), (16), (17) підраховувалась максимальна абсолютна похибка за формулою (3).

Окрім девіації періодичні електричні сигнали піддаються флуктуації, тобто зміні в часі. Тому для їх оцінення користуються як миттєвими значеннями параметрів, так і усередненими за деякий проміжок часу (інтервал). Такі оцінення дають змогу підвищити інформаційну складову, отриману при перетворенні (вимірюванні) та опрацюванні періодичних сигналів. В основу вказаних перетворень також можна покласти комбіновані алгоритми.

Так, при перетворенні періоду T_x деякого періодичного сигналу $U(t)$ комбінований алгоритм може реалізуватися шляхом укладання (порівняння) зразкової величини t_e у T_x при $T_{x_j} > t_e$ або T_x у t_e при $T_{x_j} < t_e$.

Для першого випадку ($T_{x_j} > t_e$) перетворення періоду T_{x_0}, що є середнім значенням за деякий прийнятий інтервал усереднення T, запишемо, відповідно до комбінованого алгоритму, такі вирази

$$T = \left[C + \left(1 - \varepsilon_0\right)\right]T_{x_0} + (-1)^{1+\varepsilon_0} t_{k_0},$$

$$t_{k_0} = \left[C_1 + \left(1 - \varepsilon_1\right)\right]t_e + (-1)^{1+\varepsilon_1} t_{k_1},$$

$$\left.\begin{aligned} t_e &= \lambda_1 t_{k_1} + (-1)^{1+\varepsilon_2} t_{k_2} \\ t_e &= \lambda_2 t_{k_2} + (-1)^{1+\varepsilon_3} t_{k_3} \\ &\vdots \\ t_e &= \lambda_{n-1} t_{k_{n-1}} + (-1)^{1+\varepsilon_n} t_{k_n} \end{aligned}\right\} (n = 1,2,3,\ldots),$$

де ціле додатнє число $C-$ кількість періодів T_{x_0}, що усереднені за інтервал T з недостачею; t_{k_ν} – менший з двох залишків, що отримані за алгоритмами Енгеля і Остроградського, $\nu = 0,1,2,\ldots$. Інші позначення прийняті у попередніх виразах.

Довжина інтервалу T визначається частотою сигналу, що досліджується, його флуктуацією, а також точністю перетворення.

Виходячи з прийнятих співвідношень значення T_{x_0}, для випадку $T_{x_j} > t_e$, що є середнім за інтервал T, записується як

$$T_{x_0} = \frac{1}{C + \left(1 - \varepsilon_0\right)} \left\{ T + (-1)^{\varepsilon_0} t_e \left[C_1 + \left(1 - \varepsilon_1\right) + \frac{(-1)^{1+\varepsilon_1}}{\lambda_1} + \ldots + \frac{(-1)^{1+\varepsilon_1+\ldots+\varepsilon_{n-1}}}{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_n} + \ldots \right] \right\}.$$

Для випадку $T_{x_j} < t_e$ вираз для T_{x_0} дещо зміниться:

$$T_{x_0} = \frac{1}{C + \left(1 - \varepsilon_0\right)} \left\{ T + t_e \left[\frac{(-1)^{\varepsilon_0}}{\lambda_1} + \ldots + \frac{(-1)^{\varepsilon_0+\varepsilon_1+\ldots+\varepsilon_{n-1}}}{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_n} \right] \right\}.$$

При перетворенні миттєвих значень періоду T_x отримаємо вирази аналогічні, як для T_{x_0}. Зауважимо, що випадок $T_{x_j} > t_e$ є більш загальним, оскільки містить нерівність $T_{x_j} < t_e$.

Комбіновані алгоритми можуть бути також застосовані для перетворення середнього значення частоти f_{x_0}, що характеризує періодичні сигнали, які зазнали флуктуації, тобто

$$f_{x_0} = \frac{1}{T_{x_0}} = \frac{1}{T} \left[C + \left(1 - \varepsilon_0\right) + \frac{(-1)^{1+\varepsilon_0}}{C_{k_1}} + \ldots + \frac{(-1)^{1+\varepsilon_0+\ldots+\varepsilon_{n-1}}}{C_{k_1} C_{k_2} \ldots C_{k_n}} + \ldots \right],$$

де $C_{k_j} \equiv \lambda_j$.

Порівнюючи способи перетворення різних інформаційних параметрів періодичних сигналів, бачимо, що досягнуто уніфікації алгоритмів, покладених в основу вказаних способів. Останнє підтверджується однорідністю операцій, що реалізуються, а також наведеними математичними виразами. Окрім того, запропоновані способи забезпечують перетворення фізичних величин з роздільчою здатністю меншою, ніж розмір зразкових величин, які при цьому змінюються.

Проведені дослідження показали ефективність розробленого завадостійкого комбінованого алгоритму відповідного швидкозбіжного ряду при використанні для виділення та перетворення інформаційних параметрів квазідетермінованих сигналів.

Надалі не існує теоретичних обмежень для використання комбінованих алгоритмів (рядів) для опрацювання інформаційних параметрів фізичних сигналів різної природи.

1. Якушев В.С. Первинне та вторинне перетворення і опрацювання інформаційних потоків в ІС // Вісн. Нац. ун-ту “Львіська політехніка”. – 2002. – № 464. – С. 350–357. 2. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.: Вища школа, 1983. – 456 с. 3. Зедгенидзе Г.П., Гогсадзе Р.Ш. Математические методы в измерительной технике. – М.: Издательство Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, 1980. – 615 с. 4. Якушев В.С. Математичний підхід до розроблення нових методів і засобів перетворення та опрацювання інформації // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1998. – № 330. – С. 263–268. 5. Якушев В.С. Використання активних алгоритмів перетворення і опрацювання інформації в інформаційних технологіях // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1999. – № 383. – С. 242–260. 6. Якушев В.С., Чепурний Д.А. Перетворення і опрацювання інформації з використанням алгоритму Кантора і ТЧП // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2000. – № 406. – С. 231–239. 7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 831 с.